

팔의 자세예측을 위한 비용함수의 개발에 관한 연구

최재호, 김성환, 정의승

포항공과대학교 산업공학과

ABSTRACT

A man model can be used as an effective tool to design ergonomically sound products and workplaces, and subsequently evaluate them properly. For a man model to be truly useful, it must be integrated with a posture prediction model which should be capable of representing the human arm reach posture in the context of equipments and workspaces. Since the human movement possesses redundant degrees of freedom, accurate representation or prediction of human movement was known to be a difficult problem. To solve this redundancy problem, the psychophysical cost function which represents the joint discomfort was suggested, and it was shown that psychophysical cost function can predict the arm reach posture accurately. But the joint discomfort that human feels at the joint can not be predicted since the effects of external factors on the joint discomfort is not known. In this study a psychophysical experiment using the magnitude estimation technique was performed to evaluate the effects of external factors such as joint, joint angle and Perceived Exertion Ratio on the joint discomfort. Results showed that the joint discomfort increased as the Perceived Exertion Ratio increased, but the relation is not linear and was affected not only by the joint but also by the joint angle for the same Perceived Exertion Ratio. The interaction effect of the joint and the joint angle was also significant. From the results it is needed to develop the cost function which can predict the joint discomfort considering the joint, joint angle and external load.

1. 서론

인간-기계시스템 및 제품의 설계시 사용되어온 고전적인 인간공학 기법은 Prototype 또는 Mock-Up을 이용하여 이미 설계되어진 제품을 평가하거나 사용자 또는 작업자들을 대표하는 피실험자들의 평가를 통한 반복적인 수정, 보완 과정으로 수행되어 왔다(Bonney, Case and Porter, 1989). 그러나 이러한 방법을 사용하기 위해서는 인간공학자들은 제품의 설계가 끝난 후 Mock-Up 평가과정에 이르러서야 비로서 설계의 구체적인 평가에 참여할수 있다. 이러한 인간공학적 평가의 지연은 제품의 구상단계에서 부터 인간공학적인 개념이 반영되지 못하기 때문에 설계가 이루어진 뒤에 제품을 수정, 보완해야하는 경우가 많이 발생하며, 이러한 과정에 많은 시간과 비용의 손실이 야기됨으로서 생산성 및 경쟁력이 저하된다. 기존의 제품평가 과정의 이러한 단점을 보완하고 인간공학적인 제품의 설계 및 반복적인 평가를 효율적으로 수행하는 데 인체모델이 효과적인 도구로서 사용될수 있다(Jung, 1989).

인체모델이 효과적으로 이용되기 위해서는 제품이나 설비내에서 실제 작업자가 취하는 자세를 예측할수 있는 자세예측모델이 제공되어야 한다. 그러나 인체는 관절의 여유자유도로 인한 Redundancy때문에 동일한 작업을 수행하는 데도 수많은 가능한 자세들을 취할수 있어 실제 인간이 취하는 자세를 예측하는 것은 쉽지않으며, 이러한 자세예측 문제를 해결하기

위하여 최적화기법, 로보틱스, Neural Networks 및 발견적 기법(Heuristics)등을 이용한 다양한 기법이 연구되었다. 팔의 자세예측을 위한 연구결과 각 관절이 느끼는 불편함(Discomfort)을 비용함수로 사용한 방법이 실제 사람의 자세를 정확하게 예측하는 것으로 제시되었으며(Choe et al., 1994), 이는 인간이 자신이 느끼는 불편함을 최소화하도록, 다시 말하면 가장 편안하게 느껴지도록 자세를 취한다는 것이다. 그러나 물건을 들어올리는 경우와 같이 외적인 부하(External Load)가 주어지는 경우를 반영하지는 못하였다. 외적인 부하가 가해지는 경우의 자세를 예측하기 위해서는 외적부하에 의해 인간이 느끼는 불편함을 정량적으로 평가할수 있는 비용함수의 개발이 요구된다.

본 연구에서는 불편함을 고려한 비용함수 개발의 기초연구로서 Perceived Exertion Ratio로 주어지는 외적부하와 관절에서 느끼는 불편함과의 관계를 파악하고, 관절의 자세와 관절 종류가 불편함의 정도에 영향을 미치는지를 Magnitude Estimation 기법을 이용하여 평가하였다.

2. 자세예측 기법

인간의 자세를 예측하기 위한 연구는 Manual material handling작업의 Lifting자세의 예측모델이나 인체모델에서의 자세예측기법의 개발이 주로 수행되어져 왔다. Lifting 자세의 예측은 주로 생체역학적 관점에서 whole body posture prediction model이 제시되었으며, 인체모델에서의 자세예측은 팔의 자세예측을 중심으로 이루어졌다.

기존에 제안된 자세예측기법들은 Joint torque, Perceived Exertion Ratio, L5/S1 pressure등의 생체역학적인 측면과 Joint discomfort와 같은 심물리학적 측면의 기준들을 사용하여 이들의 값을 최소화 하는 방법을 사용하였다. 이는 인간이 자세를 취할때 각 관절에 비용함수가 설정되어있고 이들 비용함수의 값을 최소화 하도록 행동한다는 가정을 전제로 한것이다(Cruse et al., 1989). 자세예측에 사용된 비용함수들 중 L5/S1 pressure는 주로 Lifting 자세의 예측에 사용된 방법으로 일반적인 자세의 예측에는 적합하지 않다. Joint torque를 최소화하는 자세예측방법은 각 관절이 발휘할수 있는 근력의 차이를 고려하지 않았고 동일한 Torque가 다른 관절에 가해질 경우 각 관절에 작용되는 Stress의 차이를 반영하지 못하므로 이를 보정하기 위하여 Perceived Exertion Ratio를 이용한 자세예측 기법이 제시되었다. 각 관절에 가해지는 Perceived Exertion Ratio를 최소화하여 자세를 예측하는 방법은 역학적 측면에서 관절에 작용하는 Stress를 최소화 한다는 개념이며, 관절에 가해지는 Stress는 그 관절이 발휘할수 있는 최대 근력에 대해 가해지는 부하의 비율에 비례한다는 가정을 전제로 한것으로, Perceived Exertion Ratio는 관절이 발휘할수 있는 최대 Torque에 대한 그 관절에 가해지는 Torque의 비로서 나타낸다.

팔의 자세예측을 위한 연구결과 각 관절이 느끼는 불편함을 비용함수로 사용한 방법, 즉 각 관절에서 느끼는 불편함의 합이 최소가 되는 자세가 실제 사람의 자세를 정확하게 예측하는 것으로 나타났으며(Choe et al., 1994), 이는 인간이 가장 편안하게 느껴지도록 자세를 취한다는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 외적인 부하가 주어지는 경우 불편함을 최소화하는 방법으로 자세를 예측하기 위해서는 역학적인 부하에 의해 인간이 느끼는 불편함을 역학적 요소로서 표현할수 있는 비용함수의 개발이 필요하다. Perceived Exertion Ratio가 관절에 가해지는

Stress를 반영했다는 점에서 Joint Torque보다는 인간에게 느껴지는 불편함과 연관성이 크다고 할 수 있으나 이것이 인간이 느끼는 불편함을 직접적으로 표현하고 있는지에 대해서는 연구된 바가 없다.

3. Joint Discomfort

인체가 인체내부에서 느껴지는 감각에 반응하여 조절된다고 할때 외부에서 주어지는 자극에 의해 행동을 예측하는 것보다 자극에 대한 내적인 반응을 토대로 예측하는 것이 타당하며, 따라서 인간이 취하는 자세 또한 Joint torque나 Perceived Exertion Ratio와 같은 외적자극보다는 관절이 느끼는 불편함과 같이 외적부하에 대해 인체내부에서 느끼는 반응에 의해 예측하는 것이 적합하다고 할수 있다.

인간이 외부에서 주어지는 부하(External Load)에 대해 느끼는 Stress는 부하에 대한 인체 내부의 반응(Internal Response)에 의해 결정되며, 인간이 실제로 느끼는 불편함과 같은 심물리학적(Psychophysical) 반응은 외적부하에 반응하는 Stress라고 알려져 있다(Weiner, 1982). 외적부하에 대해 인체내에서 반응하는 Stress는 자극-반응의 특성(Stimulus-Response Characteristic)에 의해 결정되며 이는 부하의 형태, 인체내의 상태, 외적부하에 따른 Stress의 반응형태 등에 의해 영향을 받는다. 즉, 외부에서 주어지는 부하의 역학적인 강도가 실제로 느끼는 심물리학적 반응과 일치하는 것이 아니며 여타 조건에 의해 반응의 정도도 변화한다는 것이다. 따라서 관절에서 느끼는 불편함의 정도도 Joint torque나 Perceived Exertion Ratio와 같은 역학적 부하와 바래한다고 할수없다. 따라서 외적부하에 의해 느껴지는 불편함을 정량적으로 평가하기 위해서는 불편함에 영향을 미치는 요인을 추출하고 이들간의 연관성을 파악하여야 한다.

4. Magnitude Estimation

인간이 느끼는 주관적이고 정량화하기 어려운 불편함을 정량적으로 측정하기 위하여 Magnitude Estimation 기법이 효과적으로 사용될 수 있다. 이 기법은 원래 인간이 외부자극(External Stimulus)에 대해 느끼는 반응의 크기(Internal Sensation Magnitude)를 정량적으로 측정하기 위해 고안된 기법 중의 하나이다(Gescheider, 1985). Stevens(1957)는 인간이 주어진 자극에 대해 받는 느낌의 정도가 지수적인 관계(Power Law)임을 밝혀냈으며, Stimulus Magnitude와 Sensation Magnitude와의 관계를 Power Function으로 규정하였다. 어떤 특정한 자극에 대한 느낌을 Power Law의 관계식을 이용하여 설명하기 위해서는 Sensation Magnitude의 분포와 아울러 정량적인 크기까지 측정할수 있는 기법이 필요하며, 여러 측정기법 중 Magnitude Estimation 기법이 측정 결과의 정확성이 가장 높은 것으로 밝혀져 많이 사용되고 있다. 이 기법은 외부자극에 대해 인간이 인지하는 강도를 상대적인 숫자의 크기(Numerical Estimation)나 선의 크기(Line Production)로 나타내게 함으로서 자극의 크기와 인지강도간의 관계를 Power Law로 설명할수 있게 한다. Magnitude Estimation기법의 장점은 다음과 같다.

- 외부 자극에 대한 느낌의 관계를 이론적으로 설명할수 있으며,
- 느낌의 크기를 분포뿐만 아니라 차이까지 밝힐수 있고,
- 느낌의 크기를 표현함에 있어 크기의 제한이 없으며,
- 느낌을 정량적으로 표현할수 있다.

이러한 Magnitude Estimation 기법은 외적부하에 의해 인체내에서 느껴지는 불편함의 정도를 정량적으로 측정하는데 적합한 방법이라고 할수 있다.

5. 실험

Perceived Exertion Ratio로 주어지는 외적부하와 관절에서 느끼는 불편함과의 관계를 파악하고, 관절의 자세와 관절 종류가 불편함의 정도에 영향을 미치는지를 알아보기 위하여 실험을 수행하였다.

실험 계획

실험은 관절의 종류, 관절의 각도와 Perceived Exertion Ratio를 독립변수로 하는 3인자 Within-Subject Design으로 구성하였다. 관절의 종류는 Shoulder와 Elbow의 두 수준으로, 관절 각의 수준은 각 관절의 Range of Motion(ROM)의 중간각도(Center Angle)와, 중간각과 Range of Motion 양끝과의 두 중간각의 3수준으로 설정하였다. Perceived Exertion Ratio는 최대 발휘근력의 25, 50, 75, 100%인 4개 수준으로 구성하였다. 각 실험변수의 정의는 표 1과 같으며, 피실험자가 각 실험 조건에서 느끼는 불편함을 나타낸 수치를 종속변수로 하여 분석을 실시하였다.

표 1. 실험변수

변수	수준	정 의
관절 종류	Shoulder Elbow	어깨관절 팔꿈치관절
관절각도	25% 50% 75%	ROM의 중간과 최대 Flexion각도의 중간각 ROM의 중간각 ROM의 중간과 최대 Extension각도의 중간각
Perceived Exertion Ratio	25% 50% 75% 100%	각 관절각에서 최대 근력의 25% 부하 각 관절각에서 최대 근력의 50% 부하 각 관절각에서 최대 근력의 75% 부하 각 관절각에서 최대 근력의 부하

실험 방법

본 실험에는 근육과 관절계통에 질병이나 이상이 없는 건강한 20대 남자 2명이 피실험자로 참여하였다. 실험과정은 우선 어깨와 팔꿈치 각각에 대해 각도를 실험변수에서 설정된 자세로 취한 상태에서 각 관절의 최대발휘근력을 측정하여 각 Perceived Exertion Ratio에 해당하는 부하를 결정한 후, 무작위로 설정된 순서에 의해 관절의 각도와 부하를 가한 상태에서 피실험자가 느끼는 불편함의 정도를 수치로 말하도록하였다.

Magnitude Estimation 기법은 Ratio Scaling에 필요한 초기 기준을 제시하는 방법 (Modulus Method)과 초기 기준을 제시하지 않고 응답자가 자유롭게 기준을 설정하는 두가지 방법(Free Modulus Method)이 있으며, 전자의 경우 제시된 임의의 평가기준이 피실험자의 평가기준과 일치하지 않아 평가결과가 편중되어 나타날 가능성이 있다(Zwislocki, 1983). 따라서 본 실험에서는 불편함을 표현하는 수치는 특정 기준을 제시하지 않고 피실험자 스스로 기준을 설정하게 하고 불편함의 정도를 자신의 기준에 대한 비로 평가하도록 하는 Free Modulus Method를 사용하였다.

6. 결 과

피실험자가 평가한 불편함의 결과를 종합 분석하기 위하여 각 피실험자의 평가 결과를 표준화 하였다. 표준화는 각 피실험자가 평가한 불편함의 최대치에 해당하는 값에 대한 비율로 변환하였다.

관절의 종류, 관절 각도 및 Perceived Exertion Ratio와 불편함과의 관계를 파악하기 위하여 분산분석(ANOVA)를 실시하였으며, 결과를 표 2에 정리하였다.

표 2. 분산분석 결과

Source	DF	SS	MS	F	P
Joint	1	8.585	8.585	62.34	0.000*
Angle	2	16.190	8.095	58.79	0.000*
Exertion Ratio	3	208.582	69.527	504.89	0.000*
Joint*Angle	2	1.443	0.721	5.24	0.013*
Joint*ER	3	0.644	0.215	1.56	0.225
Angle*ER	6	0.815	0.136	0.99	0.457
Joint*Angle*ER	6	1.745	0.291	2.11	0.089
Error	24	3.305	0.138		
Total	47	241.310			

분산분석 결과 관절 종류에 따른 불편함의 차이가 통계적으로 유의한 수준인 것으로 나타났으며($p=0.01$), 어깨와 팔꿈치 관절에서 느끼는 불편함의 평균적 비율은 그림 1과 같다. 이는 동일한 Perceived Exertion Ratio로 주어지는 외적부하에 대해서 어깨와 팔꿈치에서 느끼는 불편함에 차이가 있으며 팔꿈치 보다는 어깨에서 동일한 Perceived Exertion Ratio에 대해 더 불편하게 느낀다는 것을 의미한다.

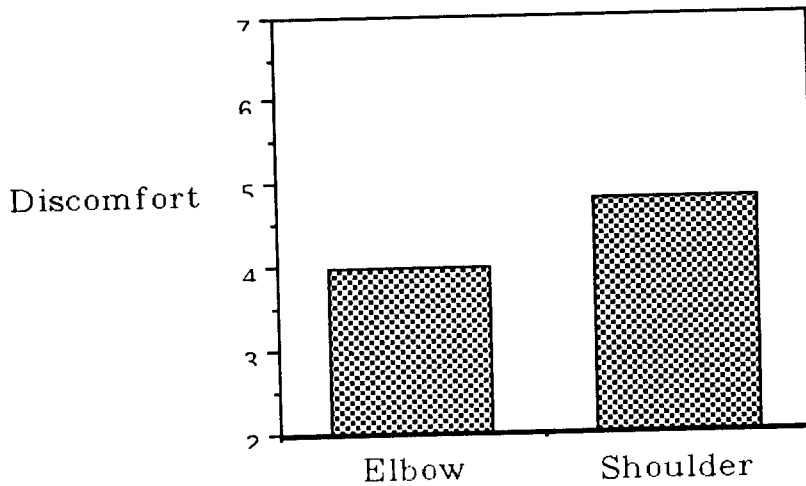


그림 1. 팔꿈치와 어깨관절의 불편함 차이

관절의 각도가 불편함에 미치는 영향에 대해서도 통계적으로 유의한 결과가 나타났으며($p=0.01$), 팔꿈치와 어깨관절의 각도변화에 따른 불편함의 차이는 그림 2와 같다. 즉, 동일한 Perceived Exertion Ratio로 각 관절에 부하가 주어지더라도 관절의 각도, 즉 자세가 변함에 따라 느끼는 불편함이 다르다는 것을 알수있다.

또한 관절의 종류와 관절각도의 교호작용도 유의한 것으로 나타났다($p=0.05$). 이는 자세가 변함에 따라 느끼는 불편함의 차이가 관절에 따라 다르다는 것을 의미하는 것으로 팔꿈치의 경우 Range of motion의 중심각에서 불편함을 가장 작게 느끼지만 어깨의 경우는 중심각보다 Extension된 각도에서 불편함을 덜 느끼는 것으로 나타났다.

Perceived Exertion Ratio가 증가함에 따라 어깨와 팔꿈치에서 느끼는 불편함은 그림 3과 같다. 그림 3에 나타난 바와 같이 Perceived Exertion Ratio가 증가함에 따라 느끼는 불편함도 증가하며 어깨와 팔꿈치 관절에서 유사한 경향을 보이고 있다. Perceived Exertion Ratio와 불편함 간의 관계가 선형인지를 알아보기 위하여 Lack-of-Fit test를 수행하였으며, Test 결과 유의수준 0.05에서 선형관계가 아닌 것으로 나타났다. 이는 외적부하에 대해 느끼는 불편함이 비례적으로 증가하지 않으며 그림 3에서 나타난 바와 같이 Perceived Exertion Ratio가 증가함에 따라 불편함이 지수함수 형태로 증가함을 의미한다.

Perceived Exertion Ratio와 관절의 종류 및 관절각과의 교호작용은 유의하지 않은 것으로

로 나타냈다($p=0.01$). 이는 Perceived Exertion Ratio가 동일한 비율만큼 증가했을때 느껴지는 불편함의 변화는 팔꿈치와 어깨관절에서 차이가 없고 관절각의 변화에도 영향을 받지 않음을 의미한다.

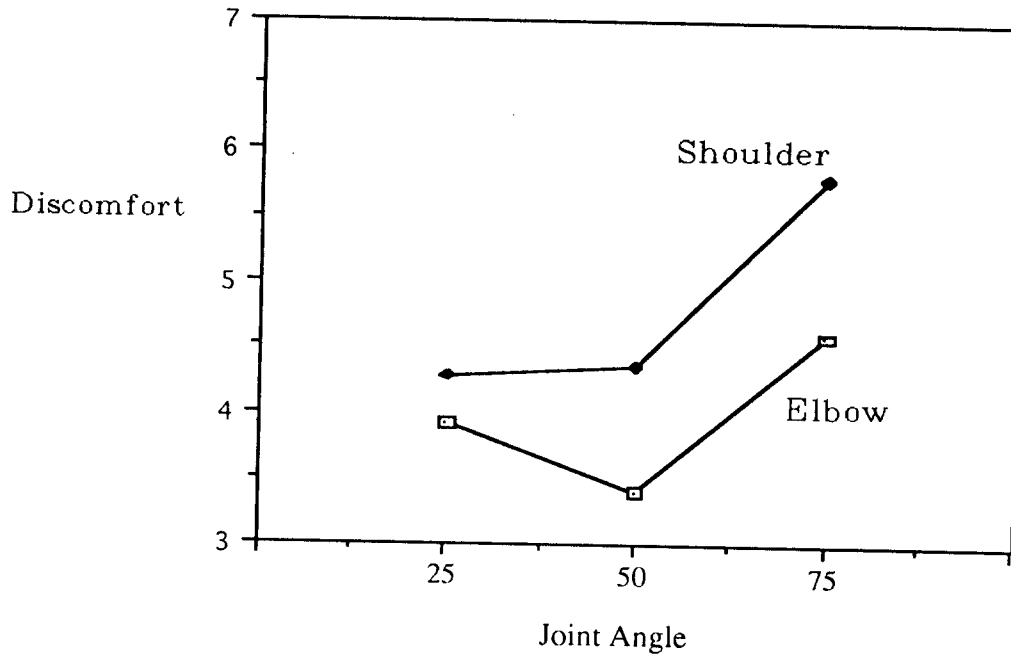


그림 2. 관절각도에 따른 불편함의 차이

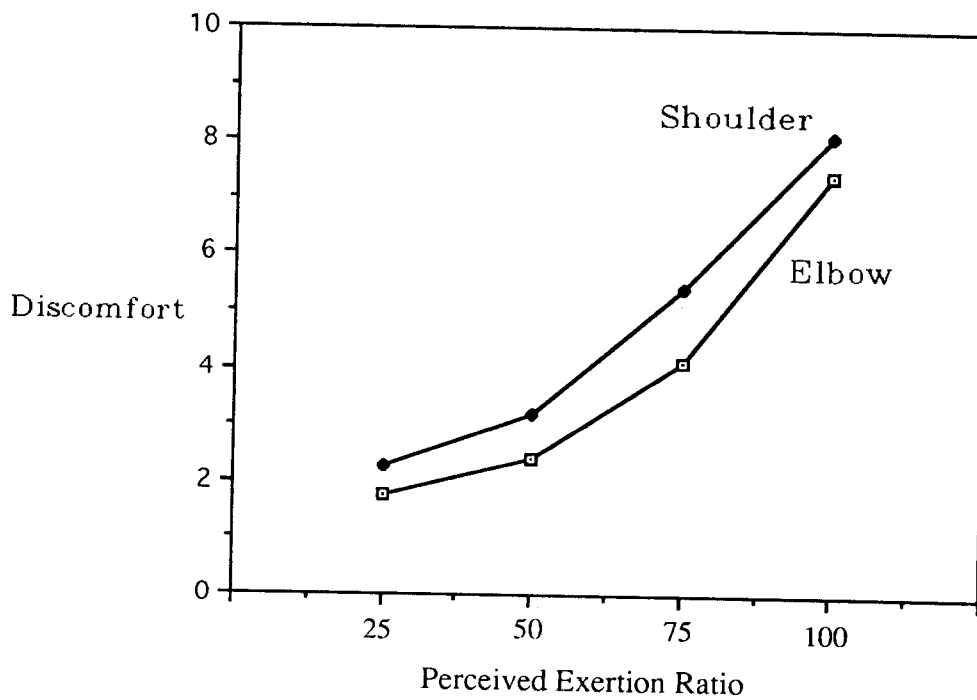


그림 3. Perceived Exertion Ratio의 증가에 따른 불편함의 변화

7. 토 의

인간의 자세를 예측하기 위하여 기존에는 인체에 주어지는 외적부하, 즉 각 관절에 작용하는 Joint torque나 Perceived Exertion Ratio등을 비용함수로 설정하여 이들 값을 최소화하는 자세를 선택하는 방법이 주로 사용되어 왔다. 이는 사람이 외부에서 가해지는 부하에 의해 각 관절에 작용되는 Stress를 최소화하도록 행동한다는 가정을 전제로 하고 있다. 그러나 Choe et al.(1994)에서 나타난 바와 같이 역학적인 부하에 의한 자세의 예측보다 불편함을 반영한 심물리학적 기준을 사용한 것이 더 정확하게 인간의 자세를 예측할수 있다. 이러한 결과는 Joint torque나 Perceived Exertion Ratio와 같은 역학적인 부하와 인체의 내적인 반응이 일치하지 않음을 의미한다. 따라서 외적인 부하에 의해서 인간에게 느껴지는 내적 반응인 불편함을 반영한 자세예측 기법의 개발을 위해서는 측정가능한 외적요소로부터 실제 사람이 느끼는 불편함을 예측할 수 있는 방법이 필요하며, 따라서 불편함에 영향을 미치는 요소와 이들간의 관계를 파악해야할 필요가 있다.

본 연구에서는 관절의 종류와 관절 각도, Perceived Exertion Ratio가 관절에서 느끼는 불편함에 미치는 영향을 파악하였다. Joint torque를 이용하여 자세를 예측할 경우 각 관절이 발휘할수 있는 근력의 차이를 고려하지 못하여 동일한 Torque가 다른 관절에 가해질 경우 다르게 작용하는 Stress의 차이를 반영하지 못하므로 이를 보정하기 위하여 Perceived Exertion Ratio를 이용한 자세예측 기법이 제시되었다. 그러나 본 연구결과 팔꿈치와 어깨에 동일한 Perceived Exertion Ratio의 부하가 주어질때에도 어깨가 팔꿈치보다 불편함을 더 크게 느끼는 것으로 평가되었다. 즉, Perceived Exertion Ratio가 신체 각 부위에서 느껴지는 불편함을 나타내지 못하며 인체가 역학적인 Stress에 의해 느끼는 불편함의 민감도가 부위에 따라 다르다는 것을 의미한다. 따라서 Perceived Exertion Ratio를 사용하여 자세를 예측할 경우 각 관절에 가해지는 Perceived Exertion Ratio를 동일하게 반영하는 것이 타당하지 않다고 할수 있다.

관절의 각도에 따라 발휘할 수 있는 Torque의 크기가 같지 않으므로 한 관절에 동일한 Torque가 가해지더라도 Perceived Exertion Ratio는 다르다. 이는 동일 Torque에 대해 느끼는 불편함이 관절각도에 따라 다른점을 반영하기는 하나, 본 연구의 결과 같은 크기의 Perceived Exertion Ratio에 대해서도 불편함이 관절각도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, Perceived Exertion Ratio만으로 관절에서 느끼는 불편함을 예측할 수 없다.

또한 같은 관절의 일정한 자세에서 Perceived Exertion Ratio의 증가에 따라 느끼는 불편함의 증가가 선형관계를 갖지 않는 것으로 나타난 것은 Perceived Exertion Ratio의 합이 실제로 사람이 느끼는 불편함의 합과 일치하지 않는다는 것을 의미한다. 실험결과에 나타난 바와 같이 Perceived Exertion Ratio가 증가함에 따라 불편함의 정도도 커지나 Perceived Exertion Ratio가 증가할수록 불편함의 증가정도가 커지는 것으로 나타났다. 이러한 증가 형태는 근육의 발휘근력의 증가에 따른 EMG amplitude의 증가와 유사한 경향으로 추후 불편함과 EMG amplitude간의 관계에 대한 연구가 불편함이 느껴지는 과정을 이해하는데 도움이 될것으로 생각된다.

본 연구의 결과 사람이 느끼는 불편함을 최소화하도록 자세를 취할 경우 단순히 Perceived Exertion Ratio의 합을 최소화 하는 방법을 이용한 자세예측이 타당하지 않으며, 관절

과 관절자세의 변화에 따른 외적부하에 대한 반응의 차이를 고려하고 외적부하와 불편함간의 비선형적인 관계를 반영할 수 있는 비용함수가 개발되어야 정확한 자세의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

8. 결 론

본 연구에서는 Perceived Exertion Ratio로 제시된 외적부하에 대해 실제 인간이 느끼는 불편함이 관절의 종류, 관절의 자세 및 부하의 강도에 따라 어떤 영향을 받는지를 Magnitude Estimation 기법을 이용하여 실험적으로 평가하였다. 연구 결과 주어진 Perceived Exertion Ratio에 의해 느껴지는 불편함은 관절부위 및 관절의 자세에 의해 영향을 받고, 관절과 관절 자세간에 교호작용도 존재하는 것으로 나타내며 또한 Perceived Exertion Ratio와 불편함이 비선형적인 관계를 나타내었다. 이러한 결과는 사람이 느끼는 불편함을 기존의 생체역학적 기준만을 사용하여 평가할 수 없으며 따라서 정확한 자세의 예측을 위해서는 외적부하와 관절, 관절각도의 함수로서 불편함을 예측할 수 있는 비용함수의 개발이 요구된다.

참고 문헌

- Choe, J., Kim, S.H. and Jung, E.S.(1994). Psychophysical cost function of joint movement for arm reach posture prediction, *In Proceedings of Korea IEMS Conference*.
- Cruse, H., Wischmeyer, E., Bruwer, M., Brockfeld, P. and Dress, A.(1990). On the cost functions for the control of the human arm movement. *Biological Cybernetics*, 62, 519-528.
- Gescheider, G. A. (1985). *Psychophysics : Method, theory and application(2nd Eds.)* Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.
- Jung, E.S., Kee, D. and Chung, M.K.(1992). Reach posture prediction of upper limb for ergonomic workplace evaluation. *In Proceedings of the Human Factors Society 36th Annual Meeting*(pp. 702-706). Santa Monica, CA: Human Factors Society.
- Jung, E.S.(1989). *Development of an expert system for ergonomic workplace design and evaluation*. Unpublished doctoral dissertation, Industrial Engineering, Pennsylvania State University, University Park, PA.
- Weiner, J.S.(1982). The Society's lecture 1982 : The measurement of human workload. *Ergonomics*, 25(11), 953-965.
- Zwislocki, J.J. (1983). Group and individual relations between sensation magnitude and their numerical estimates. *Perception and Psychophysics*, 28, 460-468.