

## 로봇 교시 · 정비작업시의 안전속도한계 Safe Speed Limit of Robot Arm During Teaching and Maintenance Work

김 동 하<sup>\*</sup>                      임 현 교<sup>\*\*</sup>  
Dong-Ha Kim                  Hyeon-Kyo Lim

### ABSTRACT

Serious injuries and deaths due to multi-jointed robot occur when a man mispercepts, especially during robot teaching and maintenance work. Since industrial robots often operate with unpredictable motion patterns, establishment of safe speed limit of robot arm is indispensable.

An experimental emergency conditions were simulated with a multi-jointed robot, and response characteristics of human operators were measured.

The result showed that failure type, robot arm axis, and robot arm speed had significant effects on human reaction time. The reaction time was slightly increased with robot arm speed, though it showed somewhat different pattern owing to failure type. Furthermore the reaction time to the axis which could flex or extend, acting on a workpiece directly, was fastest and its standard deviation was small.

The robot arm speed limit securing a 'possible contact zone' based on overrun distance was about 25cm/sec, and in this sense the validity of safe speed limits suggested by many precedent researchers were discussed.

### 1. 서 론

최근의 산업현장에서는 힘들거나 위험한 근로조건

을 회피하는 근로자들의 작업 성향이 계속 높아지는 한편, 작업환경 개선, 생산성과 능률 향상을 통한 국제 경쟁력 강화라는 측면에서 첨단기술을 응용한 산업용 로봇 등 공장 자동화 설비의 도입이 적극 추진되고 있다. 산업연구원이 펴낸 보고서 [1]에 따르

\* 충북대학교 대학원  
\*\* 충북대학교 산업안전공학과

면 1990년 현재 국내의 로봇 보유 대수는 3,880대로서 세계 8위이며, 1992년에는 7천 대를 넘어서서 오는 1994년에는 1만 대를 돌파할 것으로 전망된다.

이처럼 공장 자동화의 핵심으로 부상하고 있는 로봇은 종래의 단순한 공장 자동화 개념과는 달리 유연성이 높고 좋은 품질을 보장하며 생산주기가 짧은 생산 시스템으로 운용구조를 변화시켜준 반면에, 동작범위를 명확히 파악하기가 어려워 제조현장의 위험성을 증가시키고, 큰 동력으로 인한 새로운 유형의 치명적 재해를 초래한다. 특히, 높은 자유도를 갖는 다관절 로봇은 동작경로의 예측이 어려워 작업자가 부주의하게 작업역안으로 침입할 가능성은 상존하게 된다.

일반적으로 로봇 관련 작업자를 작업특성에 따라 조작자, 교시작업자, 정비작업자의 세 가지로 분류할 때 로봇의 위험은 대개 교시나 정비의 경우와 같이 작업자가 로봇에 접근할 때 발생하는데, 이러한 작업에 대해 안전을 확보할 수만 있다면 로봇 관련 재해의 상당부분을 예방할 수 있을 것이다.

따라서 다관절 로봇을 대상으로 하는 교시 및 정비 작업시에는, 로봇 팔이 작업자에게 도달하기 전 비상 정지 버튼을 누를 수 있도록 [2] 안전속도를 설정하는 것은 필수적인 일이다.

## 2. 연구배경

로봇의 안전속도를 설정하기 위한 최초의 연구는 Nagamachi와 Anayama[3]에 의해 수행되었다. 이 결과에 따르면 조작자는 로봇 팔의 前後운동을 다른 방향에 비하여 위험정도를 과소평가하는 경향이 있고, idle time이 2.3초 이상이면 속도에 관계없이 위험하지 않다고 판단하여 작업물을 쉽게 집어내며, 안전거리는 로봇 팔의 속도에 비례하는 경향이 있음을 밝혔다.

Sugimoto는 MTM system을 이용하여 overrun distance를 계산하고 Fig.1과 같이 안전속도를 제시하였으며 안전거리를 20cm라 할 때 교시작업의 안전속도 한계를 14cm/s로 추천하였다. 이 때, overrun distance란 로봇의 제어장치 고장 등에 의하여 운동부분이 설정된 위치 또는 경로를 벗어난 거리를 말한다.

그 후 Etherton과 Sneckenberger [4]는 로봇 팔의 속도 변화에 따른 예측 불가능 동작에 대한 인간반응을 조사하였고, Beauchamp와 Stobbe [5]는 조도, 조명대비, 운동속도, 운동역 등의 환경요인이 인간인식에 미치는 효과를 파악하였다. 또한, Etherton은 로봇 팔의 속도와 결정비용(decision cost)이 반응시간의 변화에 유의한 영향을 미치는 것을 규명하였고 최근에 Karwowski와 Rahimi [6]는 로봇 모의 감시작업을 통해 안전속도 한계가 로봇의 크기에 따라 달라진다고 보고하였다.

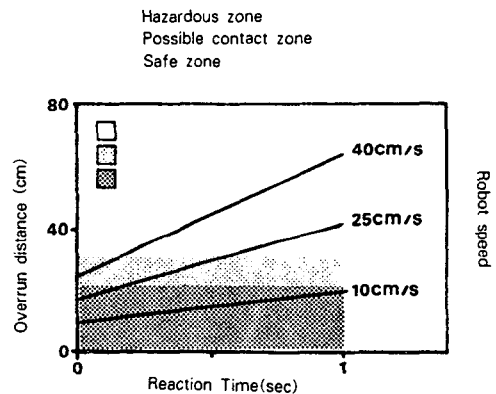


Fig.1 Overrun distance as a function of reaction time

이들을 종합하여 볼 때, 현재까지 제안되거나 권고된 교시 및 정비작업시 로봇 팔의 안전속도 한계는 Table 1과 같은데, 제안된 속도들이 차이를 보이는 이유는 로봇의 종류가 다양하고 크기도 천차만별이기 때문이다. 그러므로 로봇 교시 및 정비작업시 위의 제안속도 중에서 임의의 속도를 근거없이 안전 한 속도로 선택·적용함은 위험한 일이다.

본 연구는 위험성이 가장 높은 다관절 로봇 작업장에서 教示 및 정비작업을 하는 작업자의 체계적인 안전 확보를 위해, 다관절 로봇 팔의 이상동작에 대한 인간의 반응시간 특성들을 실험적으로 파악하여, 인간-로봇 界面 설계의 문제점들을 고찰하고자 하였다.

Table 1 Recommended safe speed limits of robot arm

제안기관 / 제안자	제안년도	제안속도
Beauchamp et al.	1991	17cm/sec
ANSI R15.06	1986	25cm/sec
Barrett	1986	14cm/sec
ISO/TC184/WG	1986	30cm/sec
NSC	1985	15cm/sec
Collins	1984	14cm/sec
Percival	1984	日 / 蘇 : 30cm/sec 獨 / 美 : 25cm/sec
Richtlinie	1984	25cm/sec
Vandeest	1984	30cm/sec

Fig. 3은 본 실험에 사용된 다관절 로봇 ROB-31K의 제원을 나타낸 것인데, 각 축들은 동시에 작동되며 그 각각의 기능 특성은 다음과 같다.

- 1축...로봇 몸체의 回轉(rotation)운동
- 2축...인간의 上腕(upper arm)에 해당되며 屈伸운동
- 3축...인간의 前腕(forearm)에 해당되며 屈伸운동
- 4축...인간의 손목에 해당되며 屈伸운동
- 5축...인간의 손목에 해당되며 上下向(supination, pronation)운동
- 6축...인간의 손아귀에 해당되며 開閉운동

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

로봇 모의 이상동작을 위해 본 실험에 사용된 실험을 위한 각 기기 상호간의 연결을 개략적으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

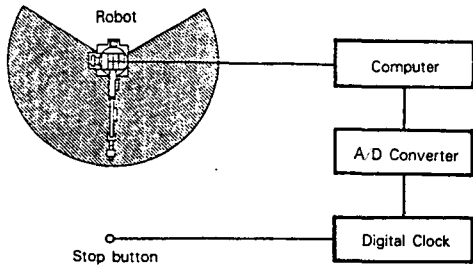
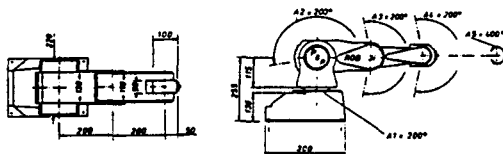


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

실험 대상 작업은 로봇 팔이 준비 위치에서 대상 물체를 들어올려 지정된 위치까지 이동시키는 단순한 물건운반(material handling) 작업이었는데, 로봇이 정상작업을 반복하다가 갑자기 이상동작을 하는 순간에 피실험자는 비상 정지 스위치를 누르도록 하였다.

로봇의 이상동작은 실험자가 정해진 속도와 위치에 따라 정상작업을 하다가 필요한 경우 난수에 의해 분기되도록 하였는데 이상동작 형태는 單一部品異常動作과 多部品異常動作의 두 가지로 분류하였다.

실험에 참여한 사람은 20대의 남자 대학생 4명과 대학원생 1명이었는데, 로봇 감시 직무에는 모두 초보자였으며, 로봇 정면의 end effector로부터 약 30cm되는 곳에 앉도록 하였다. 이들 피실험자의 반응특성은 correct response time과 이상동작시 실수의 횟수, 또한 이상동작으로 오인한 false alarm횟수의 세 가지로 파악하였다.



(a) linear dimension  
(b) movement dimension

Fig. 3 Work dimension of ROB-31K

실험은 각각의 이상동작 형태에 대해 로봇 팔 속도 4 수준(14, 20, 40, 50cm/sec) 이상동작 확률 3 수준(0.1, 0.25, 0.5)의 12개 조합에 대해 각각 50회씩 무작위 순으로 반복 실행하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 단일부품 이상동작

반응시간에 영향을 미치는 요인들의 효과를 분산 분석한 결과 Table 2를 얻었다. 이 표에 따르면 반응시간은 고장형태, 로봇트 팔 속도, 로봇트 축에 따라 차이가 있었으나 이상동작 확률의 효과는 반응시간에 영향을 미치지 않았고, 두 요인 이상의 교호작용 효과는 유의하지 않았다. 이를 좀 더 상세히 살펴보면 다음과 같다.

Table 2 ANOVA of reaction time(single-component failure)

variable	SS	d.f.	MS	F	significant
main effects	72.893	11	6.627	11.464*	.000
failure type	4.324	1	4.324	7.480*	.006
robot arm speed	40.141	3	13.380	23.147*	.000
failure prob.	1.306	2	0.653	1.130*	.323
axis	30.433	5	6.087	10.530*	.000
residual	950.896	1645	0.578		
total	1023.794	1656	0.618		

\* significant,  $\alpha=0.05$   
 단. SS :sum of square  
 d.f. :degree of freedom  
 MS :mean square  
 F :F statistic

#### (1) 위치 이상동작

로봇트 팔의 속도에 대한 반응은 Fig.4와 같다. 로봇트 팔의 속도가 느릴 때(20cm/sec 일때) 반응시간이 가장 길었고, 편차도 가장 크게 나타났다. 변동계수는 로봇트 팔의 속도가 가장 빠를 때(50cm/sec 일 때) 가장 작아 개인적 특성에 관계없이 반응 성향이 공통적이라는 사실을 알 수 있었다.

false alarm의 비율은 로봇트 팔의 속도가 증가함에 따라 감소하였으며, 실수의 비율은 증가하다 감소하여 로봇트 팔의 속도가 50cm/sec일 때에 가장 작았다.

6개의 축별 반응을 그림으로 나타내면 Fig.5와 같다. 4축은 다른 축에 비해 반응시간과 편차가 상당히 적고 실수도 전혀 일어나지 않았다. 그 이유는 해당

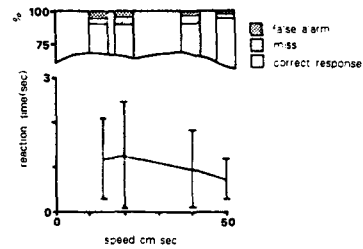


Fig.4 Response to robot arm speed (position failure)

축이 인간조작자가 가장 잘 볼 수 있는 작업물까지 내려와 작업한다는 사실과, 사람의 손목관절에 해당되어 屈伸動作을 한다는 기능특성 때문으로 판단된다. 반면 5축과 6축의 실수비율이 높다는 사실은 손목의 下向(pronation), 上向(supination) 및 손아귀의 열고 닫음 등 동작이 미세하고 작기 때문이었다고 생각된다.

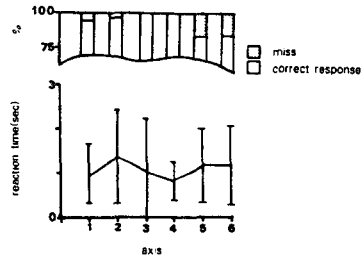


Fig.5 Response to failure axis (position failure)

#### (2) 위치 및 속도 이상동작

fig.6은 로봇트 팔의 속도에 대한 반응시간을 나타낸 것이다. 로봇트 팔의 속도가 증가함에 따라 반응시간과 편차가 감소하고, 변동계수도 점차 작아지므로 개인적인 특성에 무관하게 공동적인 경향을 갖는다는 것을 알 수 있었다.

로봇트 팔 속도가 증가함에 따라 false alarm의 비율은 점차 증가하고 실수 비율은 점차 감소하여 위치 이상동작에 대한 반응과는 다른 특성을 보여주었다.

이상동작 확률이 낮아 이상동작 횟수가 적은 경우에 false alarm 비율이 매우 높아, 자주 誤認하여 반응하는 특성을 보여주었다. 실수 비율은 이상동작 확률의 증가에 따라 증가하다 감소하였다.

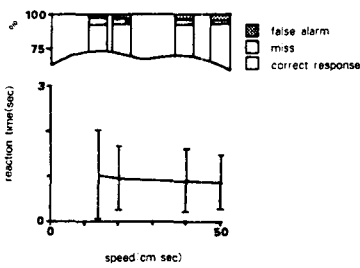


Fig. 6 Response to robot arm speed (position-with-speed failure)

축별 반응시간은 Fig. 7과 같다. 4축에 대한 반응 시간이 짧고 그 편차 또한 작아 위치 이상동작에 대한 반응특성과 같았다. 동작범위가 크게 屈伸動作을 하는 3축은 실수가 전혀 없었고 반대로 上下向 및 집는 동작을 하는 5, 6축은 실수의 비율이 높았는데, 이 역시 위치 이상동작에 대한 반응특성과 같은 경향을 보였다.

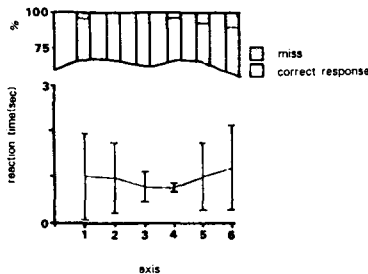


Fig. 7 Response to failure axis (position-with-speed failure)

#### 4.2 다부품 이상동작

다부품 이상동작에 대한 반응시간을 이원배치 분산분석한 결과는 단일부품 이상동작의 경우와 대체로 비슷하였고, 다만 로봇 팔의 속도와 이상동작 확률의 교호작용 효과만이 반응시간의 변동에 유의한 영향을 준다는 사실만이 달랐다.

그러나 로봇 팔의 속도가 20cm/sec일 때 반응시간의 변동계수가 가장 작아 단일부품의 반응과는 다른 사실을 보여주었다.

#### 4.3 안전 속도한계

실험에서 측정된 반응시간과 로봇 팔의 속도를 근거로 overrun distance를 계산하면 Fig. 8과 같다. Sugimoto의 '안전구역', '접촉가능구역', '위험구역'이라는 세 구역 구분에 따르면, 로봇 팔의 속도가 28cm/sec 이상일 때에는 '위험구역'에 해당하고 17~28cm/sec의 범위에서는 '접촉가능구역'에 해당한다. 결국 교시 및 정비작업을 28cm/sec보다 느린 속도로 행한다면 로봇 팔에 접촉할 가능성은 있으나 중대 상해를 피하여 사태를 수습할 수 있는 셈이다.

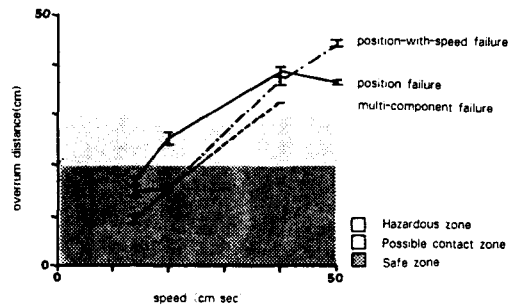


Fig. 8 Overrun distance as a function of robot arm speed

그러나 합리적인 로봇 팔의 안전속도를 결정하려면 이외에도 여러가지 사항들이 추가적으로 고려되어야 한다.

우선, 로봇의 크기에 따라 위에 제시된 안전속도를 감소시켜야 한다. 왜냐하면, 감시하는 물체의 크기가 인간의 인식 및 반응에 영향을 주기 때문이다. (Karwowski and Rahimi {6})

또한, 인간조작자의 심리, 생리적인 요인 등이 반응시간에 영향을 미칠 수 있으므로 안전속도 적용에 주의를 요한다. 더우기 감시작업을 장시간 하게되면 단조로움으로 인해 주의력이 급격히 떨어지고 졸음이 수반되는 등 작업성능이 저하되기 때문이다.

그리고, 직접적인 재해 가능성은 오히려 실수의 경우가 더욱 높으므로 이에 주의해야 하는데, 생산성이라는 측면에서는 false alarm 비율이 적은 로봇 팔의 속도가 바람직하겠지만 로봇 팔의 속도가 빨라질수록 실수의 비율이 감소하는 대신 false alarm의 비율이 증가하기 때문이다.

이러한 사항들을 고려하여 종합하면, 그 값은 대략 '안전구역'의 경우 15cm/sec 전후, '접촉가능구역'의

경우 25cm/sec 전후가 될 것이므로 Table 1의 제 안전속도들은 대체적으로 타당하다. 특히 Table 1의 수치들은 15cm/sec 전후의 수치들과 25cm/sec 전후의 수치들의 두 그룹으로 크게 분류되는데, 이것은 연구자에 따라 안전구역을 강조한 사람은 15cm/sec 전후의 속도를, '위험구역'을 강조한 사람은 25cm/sec 전후의 속도를 제안한 결과라고 판단된다.

그러나 실제로 15cm/sec 정도의 속도는 아무리 교시작업이라 할지라도 작업자가 지루함을 느낄 정도의 지나친 저속이라고 생각되므로 25cm/sec가 안전속도 한계라고 생각된다.

주의하여야 할 점은 이상의 논의가 교시 및 정비작업에 국한되는 것으로 실제 생산작업시의 로봇트 속도는 이보다 빠르다는 점이다. 따라서 작업자가 로봇트의 운동 특성을 충분히 숙지하지 않고 주의를 게을리하면 로봇트 안전사고는 언제든지 발생할 수 있으며, 특히 2인 이상의 작업자가 공동작업을 할 때 의사소통이 원활하지 않으면 치명적인 사고가 발생할 수 있다는 사실은 기존의 사고 사례에서 쉽게 찾을 수 있다[3]. 또한 로봇트의 이상동작은 그 형태나 시기, 속도 등을 예측할 수 없다는 점에서 더욱 조심해야 한다.

## 5. 결 론

높은 자유도를 갖는 다관절 로봇트는 동작경로의 예측이 어려운 반면 동력은 크기 때문에 정비작업이나 교시작업 등 작업자가 근접하는 경우 치명적인 재해가 발생할 우려가 크다. 따라서 안전 속도한계 설정은 필수적인 일이다.

소형 로봇트를 이용하여 이상동작에 대한 인간의 반응을 모의실험한 결과 로봇트 팔의 속도나 이상동작 형태는 반응시간에 영향을 주지만 이상동작 확률은 영향을 미치지 않았고, 두 요인 이상의 교호작용은 대체로 별 영향이 없었다.

작업자의 반응시간은 로봇트 팔의 속도변화에 따라 약간 증가하는 추세를 보였고, 작업물 가까이에 근접하여 屈伸動作을 하는 손목 관절 기능축에 대한 반응시간이 개인적 특성이나 이상동작 형태에 관계없이 가장 짧고 편차도 작았으며 실수도 적었다.

그러나 반응시간 특성만으로 안전속도를 설정하는 데에는 많은 무리가 있어 기타 여러가지 관련요인들

이 고려되어야 한다고 판단되었다.

실험적인 overrun distance에 근거하면, '안전구역'을 확보하기 위한 안전속도는 15cm/sec이하, '접촉가능구역'을 허용하는 로봇트 팔의 속도는 25cm/sec 전후이었으나, 여러가지 요인들을 감안할 때 25cm/sec 전후의 속도가 더 현실적인 안전속도 한계로 판단되었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 박광순, 최휴중, "로봇트산업의 발전추이와 국내 수요 전망", 산업연구원, 1992.
- [2] 박세진, 이남식, 김철중, "로봇트 안전사고 방지를 위한 비상정지 스위치의 설계지침에 관한 연구", *Journal of KIEE*, Vol.16, No.2, Dec. 1990.
- [3] Nagamachi, M., "Human Factors of Industrial Robot and Robot Safety Management in Japan," *Applied Ergonomics*, Vol.17, No.1, pp.9~18, 1986.
- [4] Etherton, J., and Sneckenberger, J.E., "A Robot Safety Experiment Varying Robot Speed and Contrast with Human Decision Cost," *Applied Ergonomics*, Vol.21, No.3, pp.231~236, 1990.
- [5] Beauchamp, Y., Stobbe, T.J., Ghosh, K., and Imbeau, D., "Determination of a Safe Slow Robot Motion Speed Based on the Effect of Environmental Factors," *Human Factors*, Vol.33, No.1 pp417~427, 1991.
- [6] Karwowski, W., and Rahimi, M., "Worker Selection of Safe Speed and Idle Condition in Simulated Monitoring of Two Industrial Robots," *Ergonomics*, Vol.34, No.5, pp.531~546, 1991.
- [7] Jiang, B., and Cheng, O., "Designing a Safe Robotic Cell," *Robotics Today*, Vol.3, No.4, pp.1~4, 1990.
- [8] Kehoe, E.J., "Practical Robot Safety," *Robotics Today*, pp.38~41, April, 1985.
- [9] 勞働省安全課編, 産業用ロボットの安全管理, その理論と實際, 中央労働災害防止協會, 1986.

김동하, 임현교

[10] 労働省安全課編, 産業用ロボットの安全必携, 1986.  
特別教育用ラキスト, 中央労働災害防止協會.

---