

## 가조작도를 이용한 소형 유압 쇼벨암의 기구평가에 관한 연구

강순동\*, 原敬\*, 허만조\*\*

### A Study on Kinematic Evaluation of Hydraulic Shovel Arms by Using a Manipulability Measure

Soondong KANG\*, Kei HARA\*, Manjo HUH\*\*

#### ABSTRACT

The paper deals with kinematic evaluation of performance of a hydraulic shovel arm for deburring task. First, a new criteria for evaluation is derived to evaluate accuracy of an end-effector at each position within the movable area of the hydraulic shovel arm. Secondly a graphic evaluation system that displays a map of the criteria for evaluation and a map of the manipulability measure is build. Thirdly, by using the system, a hydraulic shovel arm is kinematically evaluated. Finally, from the comparison of the result obtained from the computer simulation and an experimental result, it is indicated that the derived criteria for evaluation and the graphic system are useful.

**Key Words** : Hydraulic shovel(유압쇼벨), Manipulability measure(가조작도), Deburring task(디버링작업), Kinematic evaluation(기구평가)

#### 1. 서론

건설기계인 유압쇼벨은 3축구조의 암을 갖고 있으며, 건설현장에서는 경사면의 마무리 작업과 굴삭작업 등에 이용되고, 최근에는 위치정밀도 및 작업능률을 향상시키고자, 자동화 하려는 연구가 활발히 추진되고 있다<sup>(1-4)</sup>. 이러한 추세에 따라 유압쇼벨은 건설작업 뿐만 아니라 산업용 로봇으로서 응용할 수 있는 가능성이 높아지고 있다. 한편 주조후의 최종공정인 디버링 작업은 아직도 사람의 힘에 의

존하는 경우가 대부분이며 최근의 추세와는 반대로 자동화율이 가장 낮은 분야의 하나이다. 이에 따라 중소기업 대부분인 주물공장의 인력난은 심각한 실정에 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위해서도 로봇을 이용한 디버링 작업의 자동화가 시급히 요구 되어진다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 기존의 모터 구동식 로봇과 비교해서 값이 싸고 강력한 힘을 발휘함과 동시에, 작업위치의 이동이 가능한 소형유압쇼벨암을 디버링 로봇으로서 이용하는 방안을 검토하였고, 과거의 연

\* 同志社大學 기계공학과(日本)

\*\* 인천전문대학 기계설계과

구에서는<sup>(5)</sup> 높이  $h=100\text{mm}$ 에서  $\pm 1\text{mm}$  이내의 연삭 정밀도를 얻을 수 있었다. 그러나 여기서 수행한 목표제도 추종 제어 설정위치 및 연삭실험의 위치결정은 직감적이고 경험적이었다.

본 논문에서는 이와 같이 반복실험 및 경험에 의존하여 왔던 디버링(Deburring)작업위치를 보다 합리적으로 결정하는 평가지수를 제안하고 유압쇼벨암이 갖고있는 운동성능을 기구학적인 관점에서 평가하였다.

첫째로 T.Yoshikawa가 제안한 가조작도(Manipulability)를 도입하여, 본유압 쇼벨암의 특이값의 분포를 전 작동 영역내에서 계산하고 이들 특이 값에 대한 각점에서의 비율을 그래픽 표시 시스템에 의해 흑백으로 표시하였다. 또한 그라인더 선단을 각각의 높이  $h$ 에서 수평으로  $200\text{mm}$  이동시켰을 때 발생하는 특이값을 산출하여, 주어진 목표제도가 특이 자세로부터 얼마나 떨어져 있는가를 판단하는 기준으로 사용하였다.

둘째로, 유압쇼벨암의 기구적 결합에 의하여 발생하는 그라인더 선단의 수직 오차를 작동영역내의 각점에서 산출하고 이를 그래픽 표시 시스템에 의해 흑백으로 표시하였다. 또한 그라인더 선단을 각각의 높이  $h$ 에서 수평으로  $200\text{mm}$  이동시켰을 때 발생하는 그라인더 선단의 최대 수직오차 및 평균 수직오차를 산출하여 디버링 작업의 위치결정 평가지수로 이용하는 방안을 제시하였다.

이상에서 제시한 그라인더 선단의 최대 수직오차를 이용한 디버링작업위치결정의 평가 지수와 가조작도의 운동학적 평가지수의 타당성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 여기서 얻어진 그라인더 선단의 최대 수직오차 및 가조작도의 평가지수가 유효함을 나타내기 위해 유압쇼벨암의 작동영역내의 각높이  $h$ 에서 실제의 목표제도 추종 제어 및 연삭실험을 수행하였다.

## 2. 가조작도에 의한 기구평가

소형유압쇼벨의 기구학, 운동학적 자세를 평가하는데 있어서 여러 가지 측면을 고려하지 않으면 안되지만, 그중에서도 중요한 것의 하나는 암의 선단에 장착한 그라인더의 자세와 위치를 어느 정도로 자유롭게 조작할 수 있는가를 평가하는 것이다. 본 연구에 이용한 유압쇼벨은 건설작업용으로 제작되어진 것이며, 기구학적 설계 및 암의 치수는 건설작업에 이용하는데 최대성능을 내도록 설계되어 졌다고 판단되지만, 이러한 유압쇼벨을 건설작업 이외의 다른 용도로 이용할 경우에도 최대의 성능을 낼

수 있는지의 평가는 반드시 필요하다고 판단된다. 따라서 기존의 유압쇼벨에 장착된 바켓의 대응으로 그라인더를 설치 하였고, 이렇게 디버링 로봇으로 개조된 유압쇼벨암에 대하여 기구학 및 운동학적 관점으로부터 조작능력을 평가하였다. 실제실험에 사용한 유압쇼벨암(Komatsu, PC01)을 Fig.1에 나타내고, 각암의 길이 및 운동범위를 각각 Table 1에 나타내었다. 또한 암의 모델을 Fig.2에 나타내고, Table1에 나타낸 각암의 제한각도로부터 얻어

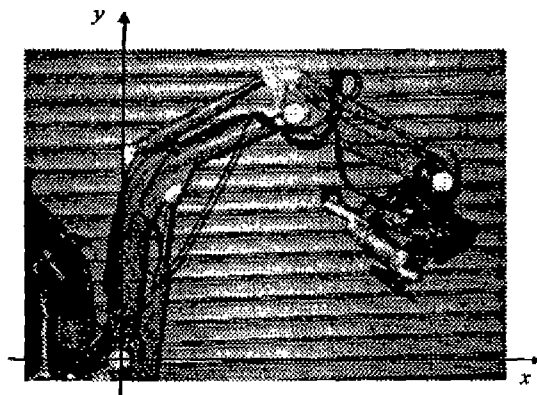


Fig.1 The arms of hydraulic shovel.

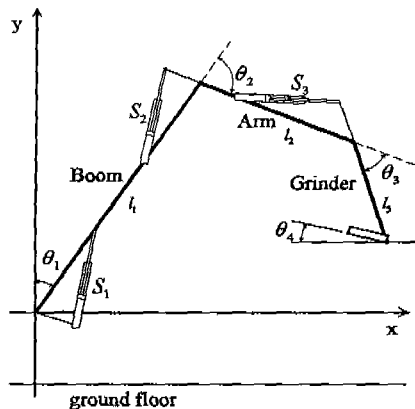


Fig.2 Schematic drawing of arm model.

Table 1. Specifications of hydraulic shovel arms.

The Length of the Arms	$l_1$	920mm
	$l_2$	480mm
	$l_3$	395mm
The Move Range of Angle	$\theta_1$	24° to 90°
	$\theta_2$	38° to 150°
	$\theta_3$	-60° to 90°

진 최대작업 영역을 Fig.3 에 표시하였다.

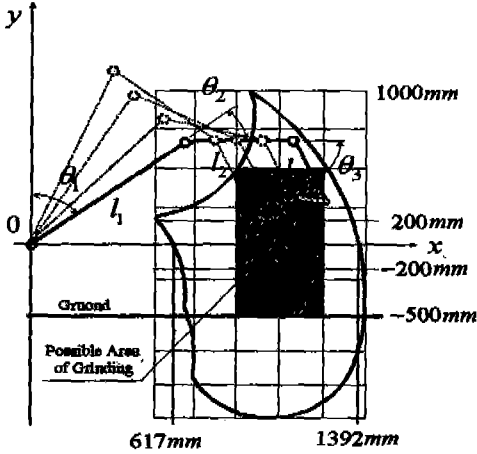


Fig. 3 Movable range.

그라인더 선단의 속도  $v$  와 각암의 각속도  $\theta$  와의 관계는 다음과 같은 형태로 나타내어 진다.

$$v = J(\theta)\dot{\theta} \quad (1)$$

여기서  $J(\theta)$ 는 자코비안 행렬을 나타내며, 3자유도를 갖는 회전관절형의 경우는

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

의 형태로 이루어 진다. 또한, 자코비안 행렬의 각 요소는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} J_{11} &= l_1c_1 + l_2c_{12} + l_3c_{123}, & J_{21} &= -(l_1s_1 + l_2s_{12} + l_3s_{123}), & J_{31} &= 1 \\ J_{12} &= l_2c_{12} + l_3c_{123}, & J_{22} &= -(l_2s_{12} + l_3s_{123}), & J_{32} &= 1 \\ J_{13} &= l_3c_{123}, & J_{23} &= -(l_3s_{123}), & J_{33} &= 1 \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} c_1 &= \cos\theta_1, & c_{12} &= \cos(\theta_1 + \theta_2), & c_{123} &= \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ s_1 &= \sin\theta_1, & s_{12} &= \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3), & s_{123} &= \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{aligned}$$

이다.

일반적으로  $\det J(\theta) = 0$ 인 경우를 특이자세<sup>(7)</sup>라고 부르며, 이러한 특이자세 및 그 근방에서는 작업을 회피하는 것이 바람직 하다. 이러한 자코비안 행렬  $J(\theta)$ 의 특이값의 크기는 특이자세로부터 얼마나 떨어져 있는가를 나타내는 지수로서, T.Yoshikawa는 매니퓰레이터의 가조작도  $W_k$ 를 나타내는 평가지수로 사용하는 것을 제안하였다. 본 연구에서도 소형유압쇼벨암의 가조작도를 나타내는 평가지수로서 자코비안 행렬의 특이값을 이용하였다. 유압쇼벨암의 가조작도의 평가지수는 다음의 식으로부터 결정한다.

$$W_k = |\det J(\theta)| \quad (3)$$

$$\bar{W}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_{ki} \quad (4)$$

여기서,  $n=20$ , (이동거리 200mm에 대한 분할수)이다.

식(3)에 나타낸 가조작도의 계산은 다음의 과정을 거쳐 계산한다.

- (A) 매니퓰레이터의 역운동학을 이용하여 직교좌표계의 참조점을 관절좌표계의 좌표로 변환한다.
- (B) 자코비안 행렬  $J(\theta)$ 을 계산한다.
- (C) 식(3)의 값을 계산한다.
- (D) 유압쇼벨암의 작동영역안에서  $W_k$ 의 값의 크기에 따라 흑백으로 표시한다.

또한 식(4)는 Fig.4에 나타낸 것과 같이 각각의 높이  $h$ 에서  $x$  축 좌표의 시점  $x_1 = 1200mm$ 에서 종점  $x_2 = 1000mm$ 까지 수평이동시켰을 때, 가조작도  $\bar{W}_k$ 의 평균값을 산출한다.

### 3. 그라인더 선단의 수직오차 평가지수

본 연구는 주물의 디버링 작업을 목표로 하기 때문에 그라인더 선단의 운동방향에 대한 수직오차가 연삭후의 정밀도를 결정하는데 중요한 요소를 차지한다. 그러나 유압쇼벨암은 건설작업용으로 만들어진 장비이며, 작업특성상 높은 정밀도를 요구하지 않기 때문에 관절의 조립오차가 일반적인 로봇보다 수십배 크다는 것은 예측이 가능하다. 이러한 건설장비를 디버링 로봇으로 이용하기 위해서는 각암의 관절이 갖는 기계적 오차를 검토하여 어느정도의 위치정밀도를 낼 수 있는지 세밀한 평가가 필요하다

고 판단된다. 그라인더의 선단에서 발생하는 수직오차의 결정적인 요인으로는 엔코더의 분해능, 관절의 조립오차 등이 있으며, 이러한 요소들을 감안한 그라인더 선단의 수직오차에 대한 평가지수에 대해 고찰한다. 그라인더 선단의 위치오차  $\Delta P$ 와 각 암의 각도오차  $\Delta \theta$ 와의 관계는 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta P = J(\theta) \Delta \theta \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = J(\theta) \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ 는 각각 그라인더 선단의  $x$ 축 방향으로 생기는 오차,  $y$ 축 방향으로 생기는 오차,  $z$ 축 방향으로 생기는 오차를 나타낸다. 본 연구는 앞에서 언급한 바와 같이 그라인더 선단의 운동방향에 대한 수직오차가 연삭후의 정밀도를 결정하므로,  $x$ 축방향의 오차 및  $z$ 방향의 오차는 무시하고,  $y$ 축 방향으로 생기는 수직오차만을 주목한다. 그라인더 선단의 운동방향에 대한 수직오차를 얻는 식은 식(6)으로부터 아래와 같이 구한다.

$$\Delta y = J_{21}\Delta\theta_1 + J_{22}\Delta\theta_2 + J_{23}\Delta\theta_3 \quad (7)$$

$$\Delta y_{\max} = |J_{21}\Delta\theta_1| + |J_{22}\Delta\theta_2| + |J_{23}\Delta\theta_3| \quad (8)$$

식(8)에서 그라인더 선단의 최대수직오차  $\Delta y_{\max}$ 는  $\Delta y_{\max} = f(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3)$ 의 관계를 가지며,  $\Delta\theta_1$ ,  $\Delta\theta_2$ ,  $\Delta\theta_3$ 는 엔코더의 분해능, 관절의 조립오차 및 암의 길이에 의해 발생하는 각 암의 각도오차를 의미한다.

본 연구에서는 각각의 암에서 발생하는 각도오차를 실제 실험을 통하여 측정하고, 이들의 값을 식(8)에 적용한다. 그리고 앞에서 말한 (A), (B), (C), (D)의 계산과정을 실행하여, 작동영역 전체의 수직오차 분포를 계산한다. 또한 각각의 높이  $h$ 에서  $x$ 축 좌표의 시점  $x_1 = 1200mm$ 에서 종점  $x_2 = 1000mm$ 까지 수평이동시켰을 때,  $y$ 축 방향의 최대수직오차 및 평균수직오차를 구해, 연삭 위치를 결정하는 평가지수로 이용하여 관계식은 아래와 같이 나타낸다.

$$\overline{\Delta y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta y_i \quad (9)$$

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

##### 4.1 가조작도의 계산

Fig.5는 식(3)에서 나타낸 자코비안 행렬의 특이값의 분포를 그래픽 시스템을 사용하여 나타낸 것이다. 이 그림의 흑백은 특이값의 크기를 나타낸 것이며 흰부분일수록 특이값은 최대가 되고, 암의 조작성이 높은것과 특이 자세로 밀리 떨어져 있는 것 임을 나타낸다. 또한, Fig.4에 나타낸 각각의 높이  $h$ 에서  $x$ 축 좌표의 시점  $x_1 = 1200mm$ 에서 종점  $x_2 = 1000mm$ 까지 수평이동시켰을 때, 가조작도의 평균값  $\overline{W}_k$ 를 Table 2에 나타내었다. Fig.4와 Table 2의 결과는 지면에 가까울수록  $\overline{W}_k$ 의 값이 최대값을 보여주고 있다. 이상의 그림은 가조작도에 의해 얻어진 결과이며 가조작도가 높은 영역이 본 유압소벨암의 운동성능을 최대한 낼 수 있는 위치를 나타내며, 또한 기구적으로 무리가 따르지 않는 최적 자세임을 알 수 있다.

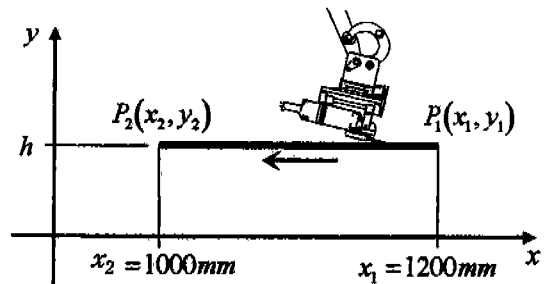


Fig. 4 Desired trajectory.

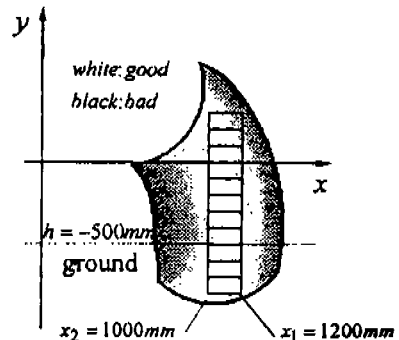


Fig. 5 Kinematic manipulability measure.

Table 2. Kinematic manipulability measure.

$h$	200mm	100mm	0mm	-100mm	-200mm
$w_i$	0.384	0.410	0.424	0.428	0.421

### 4.2 수직오차의 계산

식(8)에 나타낸  $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3$ 는 엔코더의 분해능, 조립오차 등에 의해 발생하는 오차로서, 이것들의 값은 실제실험을 통하여 산출하였다. 유압쇼벨암의 작동영역 안에서 각각의 암에 발생하는 최대오차를 측정하여 Table 3에 나타내었고, Table 4에는 각각의 높이  $h$ 에서 그라인더 선단을 수평으로 이동 시킨후 각암에서 발생한 최대오차를 나타내었다. Table 3에서 얻어진 값들을 식(8)에 적용하여 그라인더 선단에서 발생하는 수직오차의 최대값을 산출하였으며 그 결과를 Table 5와 Fig.6에 나타내었다. Fig.6에서 흑색은 최대수직오차의 크기를 나타내며, 그 값이 클수록 검게 표시하였다. 이들 결과로부터 알 수 있듯이 그라인더 선단의 최대수직오차는 지면에서 멀수록 크고, 또한 그라인더 선단의 위치가 유압쇼벨암의 본체로부터 멀어질수록 커짐을 보여주고 있다.

이상의 결과로부터 소형 유압쇼벨을 이용한 디버링 작업의 위치는 가능한 한 지면에 가까울수록 최대정밀도를 낼 수 있다고 판단되며, 주물의 고정장치는 유압쇼벨의 본체에 가까울수록 좋다고 판단된다. 또한 지면으로부터

Table 3. The Maximum error of joint angle.

	Joint Error
$\Delta\theta_{1max}$	0.0409[deg]
$\Delta\theta_{2max}$	0.1996[deg]
$\Delta\theta_{3max}$	0.5882[deg]

Table 4. The maximum error of joint angle in each height.

$h$	200mm	100mm	0mm	-100mm	-200mm
$\Delta\theta_{1max}$	0.034[deg]	0.035[deg]	0.030[deg]	0.040[deg]	0.040[deg]
$\Delta\theta_{2max}$	0.148[deg]	0.199[deg]	0.161[deg]	0.168[deg]	0.178[deg]
$\Delta\theta_{3max}$	0.371[deg]	0.399[deg]	0.426[deg]	0.472[deg]	0.588[deg]

Table 5. The maximum error ( $\Delta y_{max}$ ) and average error ( $\bar{\Delta y}$ ) of grinder in Each Height

$h$	200mm	100mm	0mm	-100mm	-200mm
$\Delta y_{max}$	4.112mm	3.984mm	3.823mm	3.640mm	3.450mm
$\bar{\Delta y}$	3.788mm	3.629mm	3.436mm	3.220mm	2.997mm

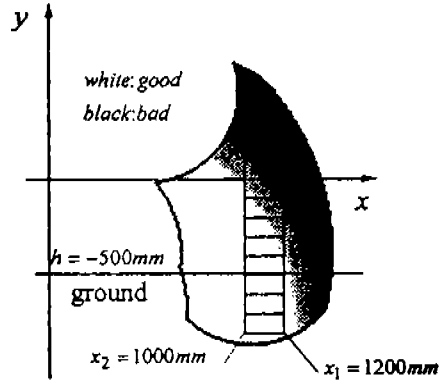


Fig. 6 The maximum error of grinder.

제1암의 관절위치까지의 높이는  $h=500mm$  이고, 주물의 고정장치 높이는  $300mm$  이므로 본 연구에서의 최적 디버링 위치는  $h=-200mm$ 임을 알 수 있다.

### 5. 실기 실험

본절에서는 앞에서 평가한 소형 유압쇼벨암의 조작능력 및 그라인더 선단의 수직오차에 대하여 실제실험을 통하여 검증하였다. 검증방법으로는 PID제어<sup>(5)</sup>를 이용하여 그라인더 선단을 목표궤도에 추종시키고, 이때 발생한 그라인더 선단의 최대오차  $\Delta y_{max}$ , 최소오차  $\Delta y_{min}$ , 평균오차  $E_x$ 를 산출함으로써 그 결과를 비교 분석하고 이를 토대로  $h=200mm$ ,  $h=-200mm$ 의 높이에서 연삭실험을 수행하였다.

우선, 목표궤도 추종제어의 수행 결과를 각 높이별로 Fig.7의 (a), (b), (c), (d), (e)에 제시하였고, 이로부터 수직오차의 평균치, 최대치, 최소치를 각각 구하여 Table 6에 나타내었다. Fig.7과 Table 6에서 알 수 있듯이 지면에 가까울수록 수직오차의 최대치, 최소치, 평균치는 작아지는 경향을 보여주고 있다.

또한 실제 연삭 실험에 있어서는, 두께 4mm, 길이 200mm의 듀랄루민 판을 실험재료로 선정하여, 높이  $h=200mm$ ,  $-200mm$ 에서 연삭실험을 수행하였고, 이 결과를 각각 Fig.8과 Fig.9에 나타내었다. 이상의 실제 연

Table 6. The experiment result of trajectory control in each height.

$h$	200mm	100mm	0mm	-100mm	-200mm
$E_x$	0.793mm	0.676mm	0.681mm	0.559mm	0.652mm
$\Delta y_{max}$	2.268mm	2.057mm	2.078mm	1.926mm	1.727mm
$\Delta y_{min}$	0.004mm	0.021mm	0.025mm	0.005mm	0.003mm

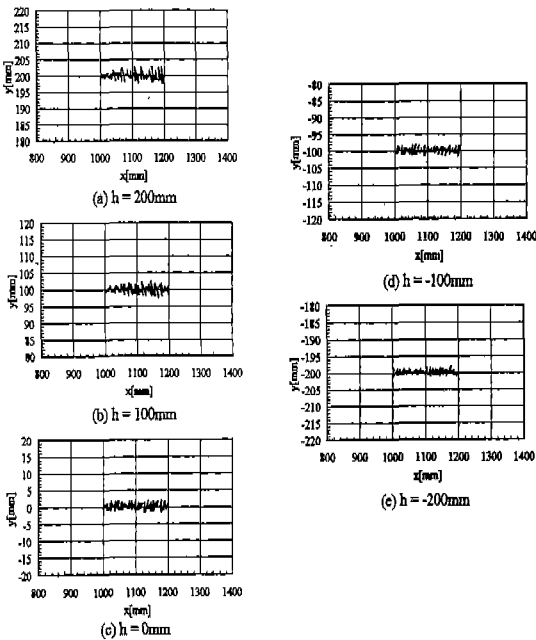


Fig.7 The experiment result of PID trajectory control.

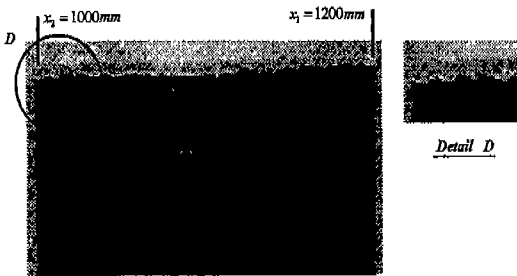


Fig.8 The result of duralumin grinding with h=200mm

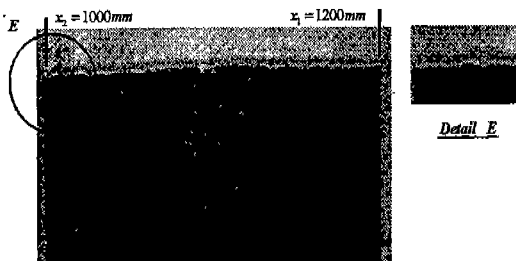


Fig.9 The result of duralumin grinding with h=-200mm

삭실험 결과에서도 높이  $h=200mm$  보다는  $-200mm$ 에서의 연삭 정밀도가 양호함을 제시하고 있다.

이상의 결과로부터, 실기시험에 있어서도 평가 결과와 동일하게 지면에 가까울수록 그라인더 선단의 최대오차가 최소값을 나타내는 결과가 얻어졌으며, 본 연구에서 제시한 디버링 작업위치 결정의 평가지수  $\Delta y_{max}$  및 그래픽 표시 시스템이 유효함을 보여주었다.

## 6. 결론

본 연구에는 가조작도를 이용한 소형유압쇼벨암의 기구 평가 및 연삭위치 결정법에 대하여 검증하였다. 본 연구의 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 이용한 가조작도<sup>(6)</sup>는 자코비안 행렬을 이용한 평가지수이며, 암의 조작성과 운동학적인 특이값을 얻는데 있어서 유효한 평가지수이다.

2) 본 소형 유압쇼벨암이 갖는 가조작도의 분포는 지면에 가까울수록 크며, 그라인더 선단의 최대수직오차는 지면에 가까울수록 작다.

3) 연삭실험결과, 본 유압쇼벨을 이용한 디버링 작업의 위치는 가능한 한 지면에 가까운 위치에 설정하는 것이 가공정밀도를 높이는 데 유익하다.

4) 본 연구에서 제시한 평가지수는 기존의 유압쇼벨암의 기구적 결함을 수정 보완하는 데 유용하다.

## 참고 문헌

1. 覺前誠, 油壓ショベルの自動制御, Kobe Steel Engineering Reports, No.3, 1988.
2. 河内政隆, ブルドーザによる平面堀削の自動化, 日本機械學會論文集, 43卷, 367號, 1977.
3. 千葉次郎, 土木建設機械における自動化, 計測と制御論文集, Vol.21, No.8, 1982.
4. 森田孝可, 파워-쇼벨의 모델링과 제어, 計測自動制御論文集, Vol.22, No.1, 1976.
5. Soondong Kang, A Study on Desired Trajectory Tracking Control by Hydraulic Shovel Arms, Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol.13, No.7, 1996.
6. 吉川恒夫, 로봇트制御基礎論, コロナ社, 1988.
7. 吉川恒夫, 로봇트 아ーム 可操作度, 日本ロボット학회, 第2卷, 第1號, 1983.