

CAD 에 의한 엑스카 베이터 (excavator) 의

굴삭능력 향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of the Digging Load Capacity of
an Excavator by CAD Technique박찬기* · 이장무**
C. K. Park, J. M. Lee

Abstract

In order to improve the digging load capacity of a domestic excavator model, computer aided design (CAD) technique was applied to the optimum design of the excavator boom.

From this study, the digging load capacity of both the bucket cylinder and the dipperstick cylinder could be made about same and the overall digging load capacity could be increased by about 50%. Also, the computer program package developed in this study can be flexibly applied to the design of other construction machines by changing and/or adding a few subprograms and the input data.

기 호

a : 크랭크 링크 (crank link) 의 길이
b : 버킷 링크 (bucket link) 의 길이
c : 가이드 링크 (guide link) 의 길이
d : 그라운드 링크 (ground link) 의 길이
e : 버킷 실린더의 최대길이
 θ_L : 버킷 실린더의 회전각 하한
 θ_U : 버킷 실린더의 회전각 상한
 θ_i : 버킷을 들었을 때 버킷 힌지 핀 (hinge pin) 과 버킷 팁 (tip) 이 수평과 이루는 각도
 θ_F : 버킷을 내렸을 때 버킷 힌지핀과 버킷 팁이 수평과 이루는 각도
 P_{Bmax} : 버킷 실린더의 최대허용압력
 P_{Dmax} : 디퍼스틱 (dipperstick) 실린더의 최대허용압력
 P_{Bomax} : 붐 (boom) 실린더의 최대 허용압력

w_B : 버킷의 자중
 w_D : 디퍼스틱의 자중
 w_{BO} : 붐의 자중
 w_{BC} : 버킷 실린더의 자중
 w_{DC} : 디퍼스틱 실린더의 자중
 $x_B - y_B$: 버킷 상의 국부좌표계 (local coordinate)
 $x_D - y_D$: 디퍼스틱상의 국부좌표계
 $x_{BO} - y_{BO}$: 붐상의 국부 좌표계
X - Y : 기준 좌표계 (global coordinate)
x - y : 기준 좌표계와 원점의 위치만이 다른 국부좌표계
 \vec{r}_i : x-y 좌표계상에서 i 점의 위치벡터

1. 서 론

크레인 (crane) 또는 엑스카 베이터와 같은 국산 중장비에 대한 설계 기술의 토착화를 위하여 이 분야에도 전산기 원용설계 (computer aided

* 서울대학교 대학원 기계설계학과

** 서울대학교 공과대학 기계설계학과

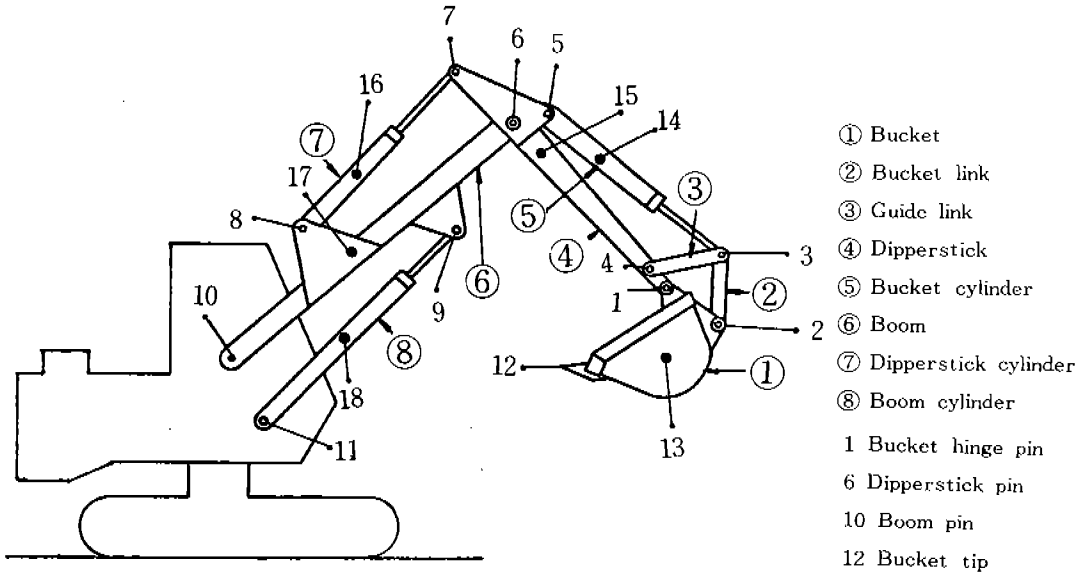


Fig. 1. Linkages and cylinders of an excavator

- ① Bucket
- ② Bucket link
- ③ Guide link
- ④ Dipperstick
- ⑤ Bucket cylinder
- ⑥ Boom
- ⑦ Dipperstick cylinder
- ⑧ Boom cylinder
- 1 Bucket hinge pin
- 6 Dipperstick pin
- 10 Boom pin
- 12 Bucket tip

design 또는 CAD) 기술 또는 최적설계 (optimal design) 기술의 도입이 요청되고 있다.

이 중장비의 최종 성능은 주로 부하능력 (load capacity) 에 의하여 결정되므로 외국에서는 이미 크레인의 인양력 (lift load capacity) 을 높이기 위하여 너클 붐 실린더 (knuckle boom cylinder) 와 연결된 4 절기구 (four-bar linkage) 를 도식적인 방법에 의하여 최적화한 예^{(1)***}가 있다.

본 연구에서는 국산 엑스카베이터 중 대표적인 모형을 선정하여 Fig. 1 에 보인 엑스카베이터의 붐 설계를 CAD 의 building block principle 을 도입하여 패키지 (package) 화 하고 이 패키지를 이용한 한가지 예로 굴삭력 (digging force) 의 향상에 대하여 연구하였다.

엑스카베이터의 굴삭력을 증대시키는 방안에는 여러가지가 있겠으나, 본 논문에서는 기존 원가에 크게 영향을 미치지 않고 설계상 큰 변형을 요하지 않는 방향에서 두가지 개선책 (4 절기구의 재설계 및 유압 실린더의 개선) 을 검토하였다.

또한 SAE 의 정의에 의한 굴삭력과 제품에 표

시된 굴삭력을 비교 검토하기 위하여 엑스카베이터 붐이 여러가지 작업 위치에서 갖는 굴삭력을 비교하여 어떻게 변화하고 있는가를 알아보았다.

2. 문제의 정의

SAE 즉 미국 자동차 공학자 협회의 정의⁽²⁾에 의하면 엑스카베이터의 굴삭력에는 두가지가 있는데, 첫째로는 Fig. 2 의 버킷실린더에 의한 굴삭력이고, 또 다른 하나는 Fig. 3 의 디퍼스틱 실린더에 의한 굴삭력이다.

버킷 실린더에 의한 굴삭력은 버킷 팁이 버킷 힌지 판에 대하여 그리는 호 (arc) 에 접선 방향으로 작용하는 힘을 버킷 실린더에 의한 굴삭력이라 정의하고 있고, 디퍼스틱 실린더에 의한 굴삭력은 디퍼스틱 실린더와 디퍼스틱을 직각으로 유지한 상태에서 버킷 팁이 디퍼스틱 편에 대하여 그리는 호에 접선 방향으로 작용하는 힘을 디퍼스틱 실린더의 굴삭력이라 정의 내리고 있는데, 이 정의는 후에 밝혀지겠지만 굴삭능력이 지상작업에서 최악의 상태일 때 결정되는 것을 알 수 있다.

*** 참고문헌 번호

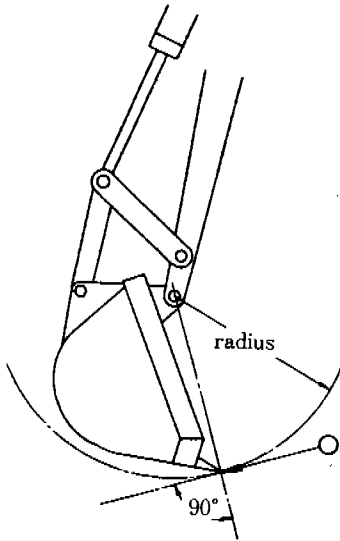


Fig. 2. Digging Force of Bucket Cylinder.

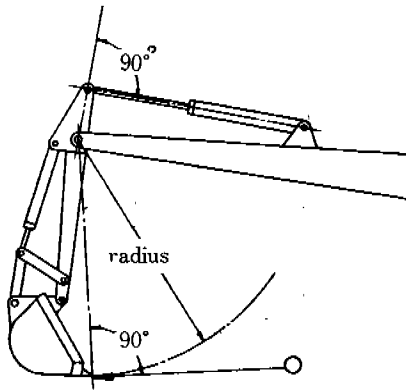


Fig. 3. Digging force of Dipperstick Cylinder.

따라서 본 논문에서는 이와 같은 SAE의 정의를 만족시키면서 지상 작업으로서 최악이라고 생각되는, 버킷 팁과 버킷힌지 핀과 디퍼스틱 핀이 일직선인 상태에서 굴삭력을 최대가 되도록 설계하였다.

굴삭능력의 최대화 또는 최적화를 위하여는 메리트(merit)이 결정되어야 하는데, 엑스카베이터의 굴삭력에는 전술하였듯이 두가지가 있어서 일반적으로 엑스카베이터의 작업자는 어떤 주어진 굴삭 작업을 행할 때 버킷 실린더와 디퍼스틱 실린더 중 어느것을 사용하여 굴삭할 것인가를 결정내리기는 어렵다.

따라서 메리트에 대하여 다음의 세 가지를 생각할 수 있다. 첫째로는, 두 실린더를 동시에 사용하여 작업한다고 가정하여 두 굴삭력을 서로 벡터적으로 합한 합력을 메리트로 하는 경우, 둘째로는, 주어진 작업상태에서 두 유압 실린더를 각각 독립적으로 사용한다고 가정을 하고, 이 경우의 두 굴삭력을 비교하여 작은 값을 메리트로 하는 것.

마지막으로는, 엑스카베이터의 운전수가 주어진 작업을 어떤 실린더를 사용하여 작업을 할지 알 수가 없으므로, 이 두 굴삭력의 효과를 균등하게 반영하자는 입장에서, 두 굴삭력에 같은 비중을 두어 그 절대값을 산술적으로 합한 메리트로 결정하는, 이와 같은 세 가지 방법을 제시해 보았는데, 본 연구에서는 마지막의 메리트를 채택하여 최적화를 수행하였다.

위와 같이 정의된 메리트를 높이기 위하여 엑스카베이터의 어느 부분을 개선할 것인가에 따라 설계변수(design variable) $x_1, x_2 \dots$ 등과 상태변수(state variable) $z_1, z_2 \dots$ 등이 선정된다.

실제상 큰 변형을 요하지 않는 범위에서 생각할 때, 엑스카베이터의 버킷과 버킷 실린더 사이에 있는 4 절기구를 최적화시킴으로써 굴삭능력을 증대시킬 수 있다. 그런데 본 연구에서 사용된 국산 엑스카베이터 모형 DH 07-3은 다용도의 굴삭기로서 버킷뿐만 아니라 로더(loader)나 크램셸(cramshell) 등과 같은 여러가지 다른 부착물(attachment)을 부착하여 작업을 행하고 있다.

이때 만일 Fig. 4에서 디퍼스틱상의 4점과 버킷상의 2 점을 설계변수로 하여 변화시킨다면, 버킷을 사용할 때에는 최적의 점이 될 수 있겠

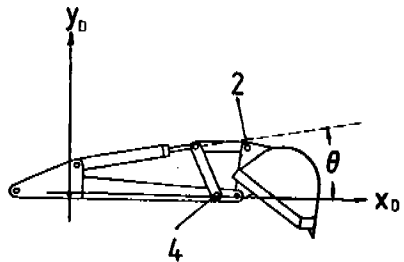


Fig. 4. Design Variables

으나 로더나 크랩셀 또는 그외의 다른 부착물을 4 점에 부착 시켰을 때는 최적의 될 수가 없다. 그러므로, 디퍼스틱상의 4 점과 버킷상의 2점은 고정을 시켜놓고, 버킷 실린더를 최대로 뻗었을 때 버킷 실린더가 Fig. 4의 x_D 축의 양의 방향과 이루는 각 θ 를 설계변수로 주었다. 이렇게 하면 다른 모든 점의 좌표 값은 주어져 있고, 버킷 실린더 길이는 최대일 때이므로, 그 다음에 버킷 실린더가 x_D 축과 이루는 각이 주어지면 버킷 링크와 가이드 링크의 길이가 결정될 수 있다.

또한 어떤 상태에서는 굴삭작업을 할 때에 유압 실린더내의 압력을 최대까지 올릴 수 없으므로, 버킷 실린더 내의 압력 z_1 과 디퍼스틱 실린더 내의 압력 z_2 를 상태변수로 택하였다. 따라서 4 절기구의 최적설계를 수식으로 간단히 표시하면 아래와 같다.

단, 이때에 붐 실린더는 굴삭보다는 인양에 주로 관계되므로 주어진 설계 값에서 그 압력이

허용값에 오는지의 여부만을 확인하였다.

최대화를 시킬 함수 : $M = f(\theta, z_1, z_2)$

구속 구역 (regional constraint) :

$$\theta_L \leq \theta \leq \theta_U \quad 0 \leq z_1 \leq p_{Dmax}$$

$$0 \leq z_2 \leq p_{Hmax}$$

구속 함수 (functional constraint) ;

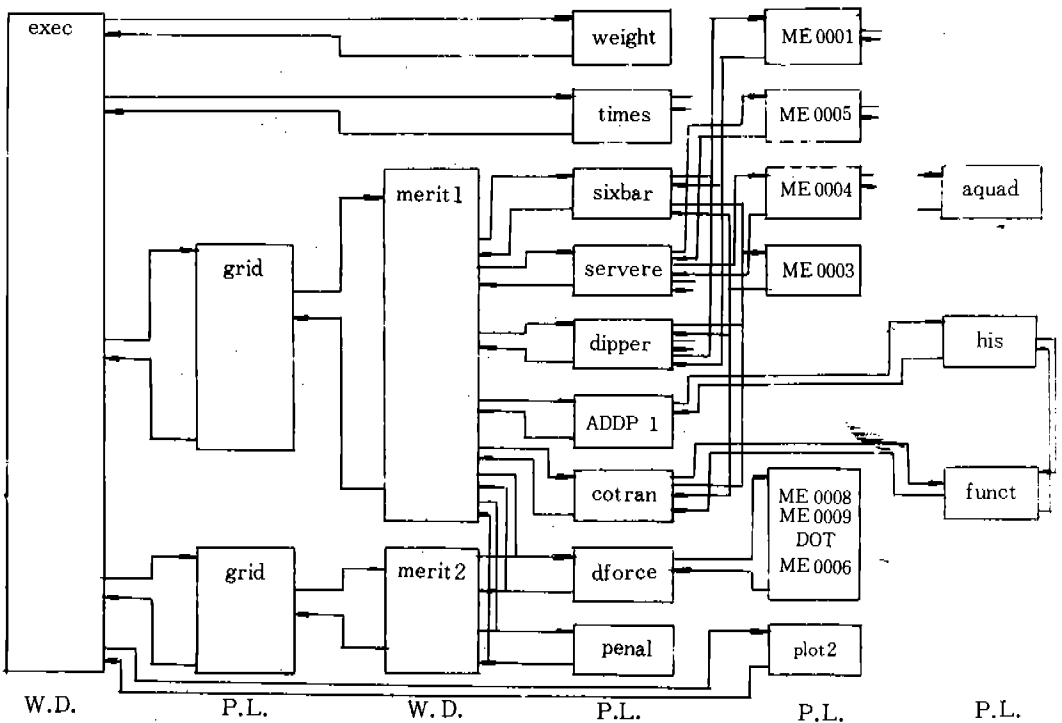
$$G_k(\theta, z_1, z_2) \leq 0$$

$$k = 1, 2, 3, 4, 5$$

이와같이 하여 최적 설계가 수행된 다음에, 그 최적 설계된 값을 갖고 디퍼스틱 실린더와 버킷 실린더의 직경을 변화시켜, 굴삭력에 미치는 영향을 검토하였다.

3. 수치해석 및 전산프로그램

위에서 정의된 설계문제를 해결하기 위하여 Fig. 5에 도시한 바와 같이 엑스카베이터의 기구학 및 정력학적 관계를 해석하고 굴삭능력을 최적화하는 전산 프로그램을 만들었다.



W. D. : Written specifically for problem by designer.
P. L. : Prewritten library routine

Fig. 5. Program arrangement for the solution of the excavator problem.

이 프로그램은 크게, 팩키지화 되어 컴퓨터에 기억되어있는 프로그램과 이 팩키지된 이용하여 다양한 실제 설계를 행할 수 있도록 팩키지 프로그램을 엮어주는 프로그램으로 구성되어 있는데, 이와같은 방식은 IOWA CADET³⁾에서와 같이 유연성이 높은 building block principle 을 이용한 것이다. 전체 프로그램 배열에서 알 수 있듯이 이 팩키지는 일부 부속 프로그램(subprogram) 과 주 프로그램(main program)을 바꾸던 유사한 장비, 즉 불도저(bulldozer)나 크레인등의 최적 설계에도 이용될 수 있도록 되어 있다. Fig. 5에 도시된 프로그램들에 대한 간략한 설명을 통하여 문제의 해석 방법을 알아보면 아래와 같다.

1) EXECUTIVE PROGRAM

Merit 1과 Merit 2 프로그램에서 결정한 목적 함수(object function 또는 merit function)의 최대값을 격자 탐색기법(grid search technique)을 이용하여 찾으려는 프로그램이다.

2) Subroutine SIXBAR

이 프로그램에서는 먼저 Fig. 6(a)에서와 같이 버킷을 최하의 위치로 내려 놓은 상태에서 버킷 링크와 가이드링크의 길이를 구한다. 버킷이 최하의 위치로 내려졌을때는 버킷 실린더를 최대로 뺐었을 때 생겨나며, 먼저 이 때의 위치에서 Fig. 6 (b)의 a, b, c, d 길이를 결정한다.

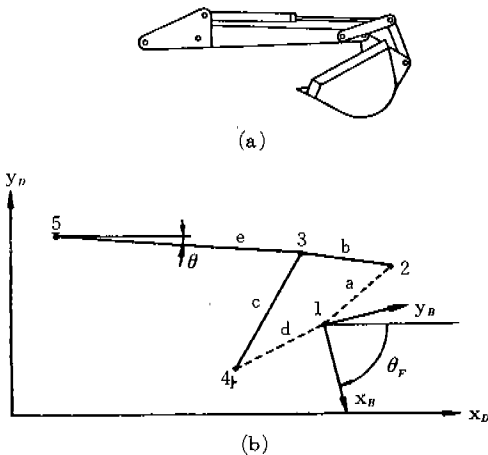


Fig. 6 (a) Actual configuration.
(b) Diagramming an actual configuration.

3 점의 좌표는 다음의 식으로 부터 구한다.

$$\begin{aligned} x_3 &= x_5 + e \cos \theta \\ y_3 &= y_5 + e \sin \theta \end{aligned} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, 1, 2, 4, 5 좌표 값 및 e 값은 입력자료이고 θ 는 설계 변수이므로, 1, 2, 3, 4의 좌표값을 알게 된다. 이때 2 점의 좌표는 $x_B - y_B$ 좌표계상의 값으로 주어지므로, 1 점의 $x_D - y_D$ 좌표계상의 값과 θ_F 를 갖고 ME 0003⁴⁾ 프로그램을 이용하여 $x_D - y_D$ 좌표계상의 값으로 좌표변환을 하여야 한다.

이와 같이하여 $x_D - y_D$ 좌표계상의 1, 2, 3, 4 좌표 값을 갖고 a, b, c, d의 길이를 구한다.

다음에 버킷을 Fig. 7 (a)와 같이 최고의 위치로 올렸을 때의 버킷 실린더 길이 h (Fig. 7 (b))를 구한다.

버킷은 1 점 주위를 회전하므로 2' 점 (Fig. 7 (b))의 2 점 (Fig. 6 (b))으로 부터의 회전각은 버킷의 회전각과 동일하다. Fig. 7 (b)로 부터

$$\begin{aligned} \beta &= \theta_2 - \pi \\ \theta_3 + \beta &= \theta_1 + \theta_4 \end{aligned} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 θ_2 는 입력자료로부터 subroutine Times에서 구한 값이다.

그러므로 θ_3 는 다음과 같이 표시된다.

$$\theta_3 = \theta_1 + \theta_4 - \beta = \theta_1 + \theta_4 - \theta_2 + \pi \dots\dots\dots(3)$$

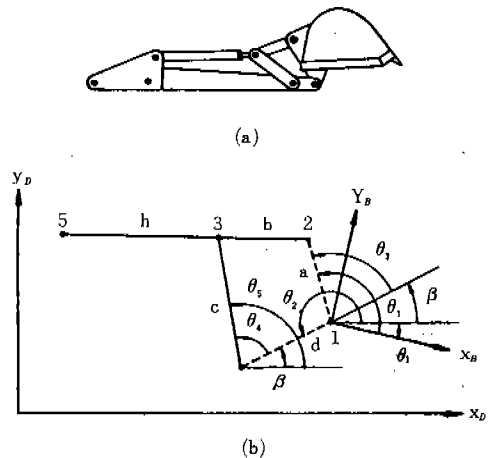


Fig. 7. (a) Actual configuration
(b) Diagramming an actual configuration

a, b, c, d의 길이와 각 θ_3 를 구했으므로 ME 0001(IOWA CADET의 ME 0034프로그램)을 이용하여 각 θ_4 를 구한다.

그러면 θ_5 는 다음식에 의하여 구해진다.

$$\theta_5 = \theta_4 + \beta = \theta_4 + \theta_2 - \pi \dots\dots\dots(4)$$

그러므로, 3'점의 좌표와 길이 h는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x'_3 &= x_4 + c \cos \theta_5 \\ y'_3 &= y_4 + c \sin \theta_5 \end{aligned} \dots\dots\dots(5)$$

$$h = \sqrt{(x_5 - x'_3)^2 + (y_5 - y'_3)^2}$$

3) Subroutine SEVERE

Fig. 8의 6, 7, 8점으로 형성되는 삼각형에서 7점을 포함하는 두선분이 직각이 되도록 ME 0005*3를 이용하여 7점의 좌표값을 $x_{B0} - y_{B0}$ 좌표계 값으로 구한다. 다음 $x_D - y_D$ 좌표계와 $x_{B0} - y_{B0}$ 좌표계가 이루는 각 θ_1 을 ME 0004*2를 이용하여 구한다.

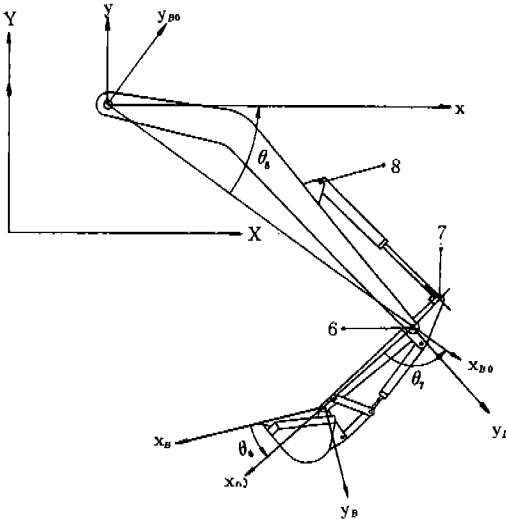


Fig. 8. Local and global coordinates.

4) Subroutine DIPPER

Fig. 9에서 버킷 실린더의 길이가 임의로 변할 때, $x_D - y_D$ 좌표계의 x_D 축양의 방향과 버킷실린더, 버킷링크, 가이드링크가 이루는 각 θ_{13} , θ_{12} , θ_5 를 구하는 프로그램이다.

Fig. 9에서 θ_5 는 다음과 같이 구한다.

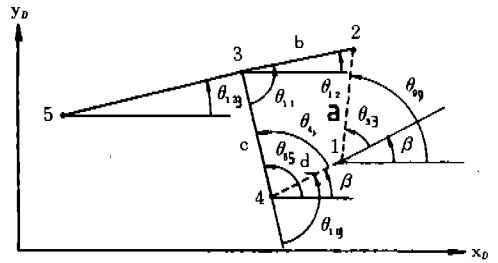


Fig. 9. Rotations of bucket cylinder, bucket link and guide link.

$$\theta_5 = \theta_6 - \beta \dots\dots\dots(6)$$

여기서 θ_6 : $x_B - y_B$ 좌표와 $x_D - y_D$ 좌표가 이루는 각에 따라 결정되는 각.

θ_5 , a, b, c, d를 ME 0001에 적용시키면 θ_4 가 구해지므로 θ_5 는 다음과 같이 된다.

$$\theta_5 = \theta_4 + \beta \dots\dots\dots(7)$$

또한,

$$\theta_{10} = \pi - \theta_4 \dots\dots\dots(8)$$

이므로, θ_{10} , a, b, c, d를 ME 0001에 적용시켜서 θ_{11} 를 구하고 다음식에 의하여 θ_{12} 를 구한다.

$$\theta_{12} = \theta_{11} - (\pi - \theta_5) \dots\dots\dots(9)$$

한편, θ_{13} 은 θ_6 로부터 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} x_3 &= x_4 + c \cos \theta_6 \\ y_3 &= y_4 + c \sin \theta_6 \end{aligned} \dots\dots\dots(10)$$

$$\theta_{13} = \tan^{-1} \left(\frac{y_3 - y_5}{x_3 - x_5} \right)$$

5) Subroutine ADDP 1

버킷 팁을 지상에 맞추었을때 $x_{B0} - y_{B0}$ 좌표계와 X-Y 기준좌표계가 이루는 각 θ_6 (Fig. 8)를 구하는 프로그램이다. 버킷 팁의 지상으로 부터의 높이를 Y라 할 때,

$$Y = f(\theta_6) \dots\dots\dots(11)$$

형태로 Y를 θ_6 의 함수가 되도록 만든 다음(sub-routine funct) subroutine HIS(Helf Interval Search)프로그램을 이용하여 Y = 0 가 되는 θ_6 값을 결정한다.

6) Subroutine COTRON

엑스카베이터의 암(arm)부분의 각 요소들이 어떤 형상을 취하고 있을 때, 입력으로 주어지는 모든 좌표값들을 모우먼트를 고려코자 하는 점에 대한 국부좌표계로 좌표변환을 하는 프로그램으로써 ME 0003 프로그램을 필요로 한다.

7) Subroutine DFORCE

Fig. 10, 11, 12에서 $\vec{F}_B, \vec{F}'_1, \vec{F}'_2, \vec{F}'_3$ 를 제외한 힘들을 갖고 6, 1, 10점에 모우먼트 평형을 취하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sum \vec{M}_0 &= \vec{r}_{12} \times \vec{F}_D + \vec{r}_{13} \times \vec{W}_B + \vec{r}_{14} \times \vec{W}_{BC} \\ &+ \vec{r}_{15} \times \vec{W}_D + \vec{r}_7 \times \vec{F}_1 = 0 \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum \vec{M}_1 &= \vec{r}_{12} \times \vec{F}_D + \vec{r}_{13} \times \vec{W}_B + \vec{r}_{10} \times \vec{F}_2 = 0 \\ \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum \vec{M}_{10} &= \vec{r}_{12} \times \vec{F}_D + \vec{r}_{13} \times \vec{W}_B + \vec{r}_{14} \times \vec{W}_{BC} \\ &+ \vec{r}_{15} \times \vec{W}_D + \vec{r}_{16} \times \vec{W}_{DC} + \vec{r}_9 \times \vec{F}_3 = 0 \\ \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

여기서는 버킷 링크와 가이드링크 및 버킷 실린더와 디퍼스틱 실린더에 걸리는 외력은 종방향의 외력만 있다고 가정하며 버킷 실린더의 하중이 버킷에 미치는 영향, 디퍼스틱 실린더의 하중이 디퍼스틱에 미치는 영향 및 붐 실린더의 하중이

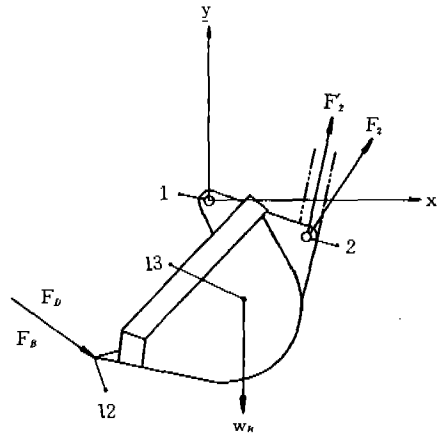


Fig. 11. Free body diagram

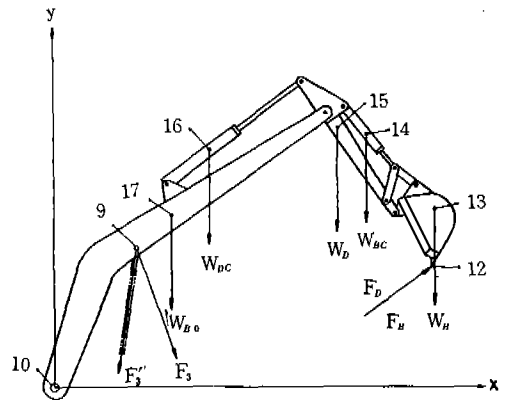


Fig. 12. Free body diagram

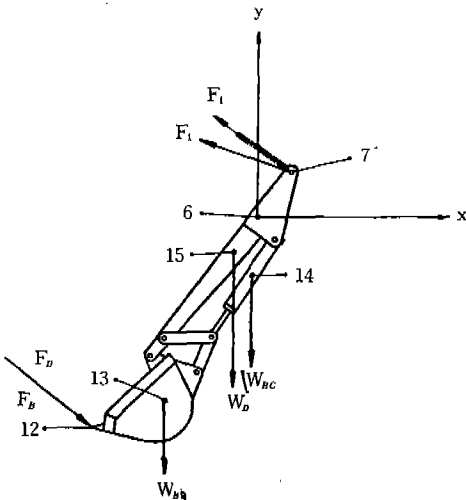


Fig. 10. Free body diagram.

붐에 미치는 영향 등은 무시하며, 또한 버킷 링크와 가이드 링크의 하중도 무시한다.

가) 디퍼스틱 실린더로 디퍼스틱을 밀때 나오는 힘 \vec{F}_1 으로 부터 ME 0008**, ME0009**를 이용하여 디퍼스틱 실린더에 의한 굴삭력 \vec{F}_D 를 (12)식에 의하여 구한다.

나) 가)에서 구한 \vec{F}_D 를 (13)식에 대입하여 \vec{F}_2 를 구하고, \vec{F}_2 의 버킷 링크 방향으로의 성분 \vec{F}'_2 를 DOT**를 이용하여 구한다. 이 \vec{F}'_2 를 ME 0006**에 적용하여 버킷 실린더에 가해지는 압력 P_B 를 구한다.

다) 나)와 같은 방식으로, (14)식에서 \vec{F}_3 를 구한 후 \vec{F}'_3 를 구하여 붐 실린더에 작용하는 압력 P_{B0} 를 구한다.

Fig. 10, 11, 12에서 $\vec{F}_D, \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3'$ 를 제외한 힘들을 갖고 6, 1, 10점에 모우먼트 평형을 취하면 다음과 같다.

$$\Sigma \vec{M}_6 = \vec{r}_{12} \times \vec{F}_B + \vec{r}_{13} \times \vec{W}_B + \vec{r}_{14} \times \vec{W}_{BC} + \vec{r}_{15} \times \vec{W}_O + \vec{r}_7 \times \vec{F}_3' = \vec{0} \dots\dots\dots(15)$$

$$\Sigma \vec{M}_1 = -\vec{r}_{12} \times \vec{F}_B + \vec{r}_{13} \times \vec{W}_B + \vec{r}_{10} \times \vec{F}_2' = \vec{0} \dots\dots\dots(16)$$

$$\Sigma \vec{M}_{10} = \vec{r}_{12} \times \vec{F}_B + \vec{r}_{13} \times \vec{W}_B + \vec{r}_{14} \times \vec{W}_{BC} + \vec{r}_{15} \times \vec{W}_O + \vec{r}_{16} \times \vec{W}_{DC} + \vec{r}_{17} \times \vec{W}_{BO} + \vec{r}_9 \times \vec{F}_2 = \vec{0} \dots\dots\dots(17)$$

- 라) 버킷 실린더로 버킷 링크를 밀때 2점에 걸리는 하중 \vec{F}_2' 를 ME 0006을 이용하여 구한 후, (16)식으로부터 \vec{F}_B 를 구한다.
- 마) \vec{F}_B 를 (15)식에 대입하여 \vec{F}_3' 를 구한 후, \vec{F}_3' 의 디퍼스틱 실린더 방향으로의 성분 \vec{F}_1 을 구하여 디퍼스틱 실린더에 가해지는 압력 P_b 를 구한다.
- 바) 다)와 같은 방식으로 (17)식에 의해서 붐 실린더에 가해지는 압력 P_{b0} 를 구한다.

8) Subroutine MERIT 1

가) SIXBAR 프로그램을 이용하여 주어진 설계 변수 값 θ 에 대한 버킷 링크와 가이드링 크의 길이를 결정하고 기하학적 적합성을 검사한다. 기하학적 적합성은 버킷을 들었을 때의 버킷 실린더의 길이가 버킷 실린더의 최단길이보다 길어야 하는 조건으로 판별한다. 즉 다음과 같이 구속함수로 표시한다.

$$l_L - h \leq 0 \dots\dots\dots(18)$$

여기서 l_L 은 버킷 실린더의 최단 길이

- 나) SAE의 굴삭력 정의에 맞게 SEVERE 프로그램을 이용하여 디퍼스틱과 디퍼스틱 실린더를 직각이 되게 하여 붐과 디퍼스틱 상의 국부좌표계가 이루는 각을 구하고, 또한 최악상태(worst case)가 되도록 디퍼스틱과 버킷 상의 국부좌표계가 이루는

각을 정한다.

- 다) ADDP 1 프로그램을 이용하여 버킷 팁이 지면에 닿았을 때 붐상의 국부좌표계와 기준좌표계가 이루는 각을 정한다.
 - 라) 가)나)다)에서 정한 붐, 디퍼스틱, 버킷의 위치에서 4절 기구가 디퍼스틱의상의 국부좌표계와 이루는 각을 DIPPER 프로그램을 이용하여 구한다.
 - 마) 위와 같이 하여 모든 요소가 서로 이루는 각이 결정되면, 이 각들과 모든 점의 좌표들을 COTRAN 프로그램에 대입하여 모우먼트 평형을 적용시킬 점에 대한 국부좌표계로 중요한 점을 좌표 변환시킨다.
 - 바) DFORCE 프로그램을 이용하여 버킷 실린더의 압력이 z_1 , 디퍼스틱 실린더의 압력이 z_2 일때, 버킷 실린더와 디퍼스틱 실린더에 의한 굴삭력을 구한 후, 버킷 실린더에 의한 굴삭력이 디퍼스틱 실린더와 붐 실린더에 가하는 압력 $P_b, P_{b'0}$ 를 구하고 마찬가지로 디퍼스틱 실린더에 의한 굴삭력이 버킷 실린더와 붐 실린더에 가하는 압력 P_b, P_{b0} 를 구한다.
- 이와 같이 하여 구한 압력은 각각 그 허용 압력을 넘는가 검사하며 이로부터 다음과 같은 구속함수를 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_b - P_{bmax} &\leq 0 \\ P_{b'0} - P_{b'0max} &\leq 0 \\ P_b - P_{bmax} &\leq 0 \\ P_{b'0} - P_{b'0max} &\leq 0 \end{aligned} \dots\dots\dots(19)$$

- 사) 가)의 기하학적 적합성과 바)의 정역학적 적합성의 검사결과 부적당한 값이 나오면, 위의 전과정에서 사용된 설계변수 θ 와 상 태변수 z_1, z_2 에 대응하는 목적함수 값은 PENAL⁽³⁾ 프로그램을 이용하여 페널표면 (penal surface) 상으로 보내고, 적당한 값 일 경우에는 목적함수 값으로 선정한다.

9) Subroutine MERIT 2

버킷 실린더와 디퍼스틱 실린더의 직경을 변화시켰을 때 굴삭력 증가에 어떤 영향을 끼치는가를 알기 위하여 만들어진 프로그램

10) Subroutine WEIGHT

엑스카베이터가 경사진 곳에 위치할 경우에 있어서의 모든 하중 벡터값을 구하는 프로그램

11) Subroutine TIMES

설계시 필요로 하는 값중에서 입력자료로부터 구할 수 있는 값들은 계산의 중복을 피하기 위하여 미리 계산을 하는 프로그램

12) Subroutine GRID

IOWA CADET의 GRID 4 프로그램을 수정한 탐사(search) 프로그램

4. 결과 및 검토

앞에서 기술한 프로그램 패키지를 국산 엑스카베이터 DHO 7-3에 적용시켜서 아래의 사항에 대하여 연구하였다.

- 1) 4절 기구의 재설계 값
- 2) 디퍼스틱 실린더의 개선
- 3) 최악 상태에 대한 가정의 타당성

첫째로 4절 기구를 최적화하면 Table 1과 같다.

Table 1. Input and output of the computer program.

A. Input data

Coordinates, length, weight, stroke, and allowable pressure of each part of DH07-3 excavator.

B. Output data

	Calculated values	Actual mode values
Bucket link	48.6 cm	50.0 cm
Guide link	51.6 cm	52.0 cm
Digging force of dipperstick cylinder	7.35 ton	6 ton
Digging force of bucket cylinder	7.33 ton	8 ton

C. Output data

	Calculated values	Actual mode values
Maximum pressure of dipperstick cylinder	250 kg/cm ²	-
Maximum pressure of bucket cylinder	167 kg/cm ²	-

본 연구에서 채택한 엑스카베이터 모델은 버킷 링크와 가이드 링크의 길이가 본 연구에서의 최적 계산치와 근사한 값을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

또한 본 연구의 계산 결과에 의하면 디퍼스틱과 버킷 실린더의 굴삭력은 거의 같은 값을 가지며 이는 운전자의 입장에서 볼 때 대단히 바람직한 결과이다.

둘째로는 Table 1에서 알 수 있듯이 버킷 실린더는 디퍼스틱 실린더가 이미 최대 압력에 도달하였으므로 최대 허용압력 250 kg/cm²에 훨씬 밑도는 167 kg/cm²밖에 사용할 수 없는 것을 알 수 있다.

따라서 디퍼스틱 실린더의 직경을 설계변수로 택하였을 때에 굴삭능력은 Table 2와 같이 더욱

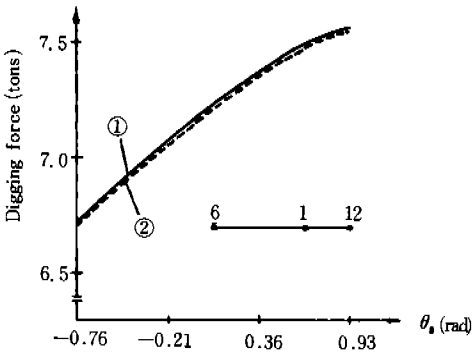
증가되는 것을 알 수 있고 버킷 실린더의 직경 증가는 굴삭력에 아무런 영향이 없는 것을 알 수 있다.

또한 디퍼스틱 실린더의 직경 증가는 버킷 실린더 내의 압력을 그 허용압력에 근접하게 해주므로 두 실린더 용량을 최대한 효율적으로 사용할 수 있게 하여 준다.

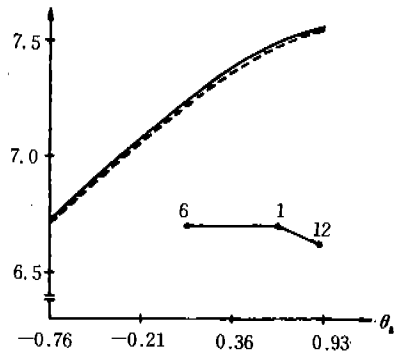
셋째로는 본 연구에서의 최악의 상태에 대한 가정과 SAE 가정에 의한 굴삭력을 검토키 위하여 디퍼스틱 핀과 버킷 힌지 핀과 버킷 팁이 일직선일 때와 팁이 일직선보다 위 또는 아래로 회전되었을 때에 대하여, 굴삭지면의 높이를 최저에서 최고로 변화시키면서 굴삭능력을 비교하였다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 버킷 팁이 일직선상에 있을 때 굴삭력이 가장 작으며, 즉 최악의 상태는 일직선 일때 일어나게 되며, 이때의 센시티비티(sensitivity)는 대단히 작다는 사실도 결

Table 2. Improved load capacity.
(Design variable: diameter of the dipperstick cylinder)

Diameter of dipperstick cylinder	Nominal		Max. digging force		calculated	
	Dipperstick P_{Dmax}	Bucket P_{Bmax}	Dipperstick cylinder	Bucket cylinder	P_D	P_B
125.0 mm	250kg/cm ²	250kg/cm ²	7.35 ton	7.33	250kg/cm ²	167 kg/cm ²
141.4 mm	"	"	9.28 "	9.28	"	214 kg/ "
148.0 mm	"	"	10.12 "	10.10	"	233 kg/ "
153.1 mm	"	"	10.81 "	10.78	"	250kg/ "



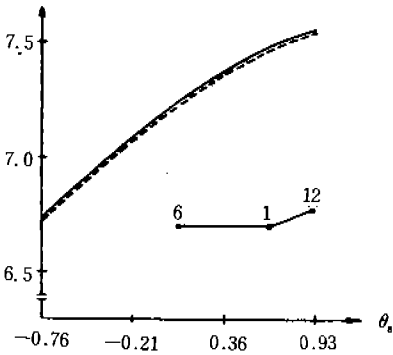
(a)



(c)

- ① Bucket cylinder
- ② Dipperstick cylinder
- 1 Bucket hinge pin
- 6 Dipperstick pin
- 12 Bucket tip

Fig. 13. Variation of digging force capacity at various boom configuration.



(b)

들어서 알 수가 있다. 또한 버킷 팁이 지면에서 높아지고 낮아짐에 따라 굴삭능력이 각각 증가되고 감소된다는 사실을 알 수 있다.

마지막으로 굴삭능력의 향상과는 직접적인 관계는 없으나 본 연구의 전산프로그램 패키지로부터 성능 향상된 엑스카베이터의 작업 범위를 Fig.14에 도시하였다.

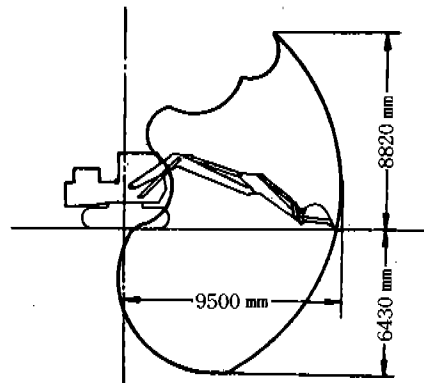


Fig. 14. Operating range of the improved excavator

5. 결 언

이상의 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

첫째, 본 연구의 대상이 된 국산 엑스카베이터는 디퍼스틱 실린더와 버킷 실린더에 의한 굴삭능력이 각각 6톤과 8톤인데 반하여 4철기구의 재설계에 의한 엑스카베이터는 두 실린더에 의한 굴삭능력이 공히 7.3톤이었다. 이는 작업자의 입장에서 볼 때에 두 굴삭력이 균등한 것이 유리하다는 가정과 일치하고 있다.

둘째, 유압 펌프와 실린더의 최대압력(250kg/cm²)을 최대한 이용하기 위하여는 디퍼스틱 실린더의 직경을 153.1mm까지 증가시킬 수 있으며, 이때에 굴삭능력은 약 48% 향상된다는 것을 알았다.

셋째, SAE의 굴삭력에 대한 정의와 최악의 굴삭조건에 대한 검토 결과는 정의와 가정이 합당한 것임을 보여 주었다.

넷째, IOWA CADET의 알고리즘을 이용하여 완성된 본 연구의 전산 프로그램 패키지는 다른 기종의 엑스카베이터는 물론 유사한 유압건설장비의 최적 설계에도 단지 몇 개의 부속 프로그램과 입력 데이터를 바꾸어 줌으로써 가능하다.

한편, 본 연구 결과는 다음의 이유로 해서 실제의 최적 설계결과와 약간의 차이가 있을 것이 예상된다.

첫째, 엑스카베이터를 정역학과 기구학의 관점에서 취급하여 응력해석이 누락되어 있고, 둘째, 엑스카베이터가 경사진 곳에서 작업하는 경우는 무시하고 수평상태에서 작업한다고 가정한 것이다.

앞으로 본 논문에서 개선할 점에 대하여 생각해 보면,

첫째, 재료의 항복과 좌굴을 고려하여야 완전할 것이며,

둘째, 엑스카베이터를 동적인 상태에서 3차원으로 해석하여야 하며

셋째, 엑스카베이터의 넘어짐(tipping)을 고려하여야 완전하다.

이 논문에서는 굴삭력을 최대화시키고 있으나, 이밖에도 엑스카베이터의 등판능력, 작업 범위

의 확대, 또한 인양능력 등도 최대화시킬 수가 있을 것으로 생각된다.

본 연구의 전산 프로그램은 KIST의 CYBER와 서울대 전산소의 IBM370으로 각각 10분, 20분이 걸렸다.

6. Appendicies(*)

1) Subroutine ME 0003 : 좌표 변환프로그램
입력 : 구 좌표계상의 좌표계가 이루는 각, 신 좌표계의 원점이 구 좌표계상에서 갖는 좌표값.

출력 : 신 좌표계상의 좌표값

2) Subroutine ME 0004 : 어느 한 점의 좌표가 두 좌표계에서 갖는 좌표값을 갖고 두 좌표계가 이루는 각을 구하는 프로그램.

입력 : 구 좌표계상의 좌표값, 신좌표계상의 좌표값

출력 : 신-구좌표계가 이루는 각

3) Subroutine ME 0005 : 원밖의 한 점에서 원에 그은 접선의 접점 좌표를 구하는 프로그램
입력 : 원의 중심의 좌표, 원의 반경, 접선을 그을 원밖의 점의 좌표.

출력 : 접점의 좌표

4) Subroutine ME 0006 : 라미의 정리

5) Subroutine ME 0008 : 외적(cross product)

6) Subroutine ME 0009 : 벡터의 가감

7) Subroutine DOT : 내적(dot product)

참 고 문 헌

1. B. N. Sridhar, "Methods for Improving the Knuckle Boom Capacity in Truck Mounted Cranes," ASME Journal of Engineering for Industry, November 1976.
2. "SAE Handbook Part II" 1978.
3. Charles R. Mischke, "An Introduction to Computer - Aided Design," Prentice Hall, 1967.
4. 김승우, 이장무, "서울 지하철 전동차의 최적 감속 기어비," 대한기계학회 논문집 제3권 제3호, 1979.