

압출성형을 위한 마찰수식 모델에 관한  
연구

호서대학교 기계공학과전공\*,  
자동차부품연구원 \*\*,  
호서대학교 기계공학과 \*\*\*

오박균\*, 김정선\*\*, 유성관\*\*\*



# 압출성형을 위한 마찰수식 모델에 관한 연구

오 박 군, 김 정 선, 유 성 관(호서대학교 기계공학과)

## A Study on the Numerical Friction Model for the Extrusion

P. K. Oh\*, J. S. Kim\*\*, S. K. Yu\*\*\*(Hoseo University)

**Key Words** : Extrusion (압출), Tribology (마찰· 마모· 윤활), Hydrodynamic Lubrication (유체동역학 윤활).

**Abstract** : To carry out perfectly the forming analysis of the extruding products, it is necessary that the friction boundary condition between dies and blanks should be worked out the accurate numerical friction models. But the numerical friction models adapting in the conventional Extrusion forming software may be large different from the actual conditions. Especially, the use of the existing extrusion forming software is possible only in the limited range owing to the unaccuracy of the high speed forming work. Therefore, the prepare of this study is to develop the numerical friction model which describes the friction boundary condition mathematically well, to improve the accuracy of the extrusion forming analysis, and finally to expand the applying areas of the results.

### 1. 서 론

기계 구동부에서 접촉하여 동력이 전달되는 경우에는 접촉면에서의 온도의 급격한 변화는 마찰에 의한 접촉 열저항에 의해 생긴다.<sup>(1)</sup> 이와 같은 현상에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

기체에서 압력이 감소되면 분자의 평균 자유행로는 커진다. 만일 분자의 평균 자유행로가 공극의 크기보다 더 크게 될 때까지 주위기체의 압력을 감소시켰다면 접촉 열저항은 증가한다. 이것은 이러한 조건하에서는 기체의 열전도계수가 감소하기 때문이다. 즉 구동부의 접촉압력이 증가할수록 고체간의 접촉면적은 증가하기 때문에 접촉 열저항은 감소한다. 접촉문제는 실제의 경우 매우 복잡하기 때문에 모든 형태의 물질에 대해 예측 가능한 만족할 만한 이론이나 실험식은 존재하지 않는다.<sup>(2)</sup>

접촉문제는 접촉부위의 형성과 작용하는 외력의 크기에 따라 변하고, 접촉응력도 그에 따라 변하는 이동 경계 문제이다. 또한 마찰을 고려할 경우에는 접촉영역에서 마찰에 의하여 두 물체가 상대변위를 갖는 미끄럼 영역과 상대변위가 없는 접합영역으로 나누어 진다. 마찰효과는 접촉응력의 분포에 영향을 주고, 그 효과는 접촉 물체의 물성치, 기하학적 형상 및 마찰계수의 크기에 따라 다르게 되어 해석하기가 어렵다.

접촉 구동부의 동력전달을 효과적으로 이루기 위해서는 접촉 구동부 사이의 마찰경계조건을 정확히 수식 모델화하는 작업이 필요하다. 그러나 기존의 수식 모델은 요소에 국한되어 접촉 구동부의 실제 조건과는 상당한 차이를 보이고 있다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 기계접촉 구동부의 마찰조건을 정확히 수식모델화하여, 접촉 구동부에서 마찰에 의해 낭비되는 에너지를 절감하고 기

\* 호서대학교 기계공학전공

\*\* 자동차부품연구원 부품기술개발본부

\*\*\* 호서대학교 대학원 기계공학과

존의 실험방법에 비해 상당한 양의 비용과 시간을 절약하고자 한다.

$$P_N = \frac{W}{A} = \frac{\text{하중}}{\text{면적}} \quad (3)$$

이 됨을 알 수 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 윤활해석과 마찰의 영향에 대한 고찰

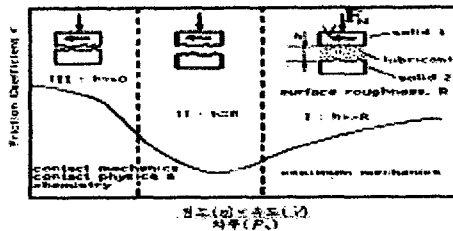
#### 2.1.1 스트리벡 곡선과 윤활영역

하중과 속도 그리고 점도를 고려한 스트리벡 (Stribeck) 곡선과 이에 따른 윤활영역을 나타내면 그림1과 같다. 그리고 그림3에서 마찰계수( $\mu$ )는

$$\tau = \eta \frac{U}{h} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\tau}{P} = \frac{\eta U}{P \cdot h} \quad (2)$$

이 성립하고 이에 의해



I : Hydrodynamic lubrication and EHD lubrication  
 II : Partial EHD lubrication or mixed lubrication  
 III : Boundary lubrication

그림1. Stribeck curve and lubrication region

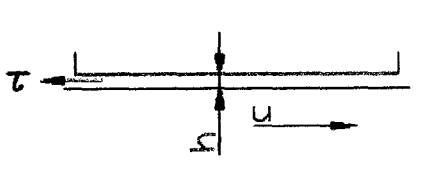


그림2. Friction in Slider

$$\mu (\text{마찰계수}) = \frac{\tau (\text{점도}) \times U (\text{속도})}{P_N (\text{하중})} \cdot \frac{1}{h_L (\text{유막두께})}$$

이때

#### 2.1.2 유체막중의 전단응력과 마찰력

윤활 기능의 하나는 마찰력의 경감에 있으나 윤활막이 아무리 두꺼워도 운동에 저항하는 접선력이 남는다. 마찰계수의 현저한 감소는 유체 막을 형성함에 따라 가능하게 되고 전형적으로는 1에서 0.001정도로 작게 할 수 있다. 그러나 이렇게 비교적 작은 마찰력으로도 에너지의 소비를 일으켜 기계효율의 손실을 받게 된다. 따라서 설계자의 목적은 이러한 힘을 가능한 작은값으로 감소시키는데 있다. 그림3에서 나타난 윤활접촉을 한 고체의 저항을 평가하기 위해 다음식으로 나타나는 Newton의 점성식을 사용한다.

$$\tau = \eta \frac{du}{dz} \quad (4)$$

여기서  $\tau$  : 표면의 전단응력

$\frac{du}{dz}$  : 전단속도

단위 폭당의 저항은 상면과 하면에서 축 길이에 따라 전단응력을 각각 적분하면

$$F_1 = \int_0^L \eta \left( \frac{du}{dz} \right)_{z=0} dx \quad (5)$$

$$F_2 = - \int_0^L \eta \left( \frac{du}{dz} \right)_{z=h} dx \quad (6)$$

마찰력의 방향은 그림3의 시스템을 생각하면 곧 알게 된다.

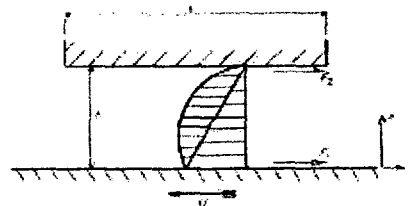


그림3. Force equilibrium on the boundary of lubrication

다시 말해서 축 하면에 작용하는 마찰력  $F_f$  은 운동의 역방향인  $x$ 의 정방향으로 작용하고 또한 상면에 작용하는 마찰력은 속도의 방향 즉  $x$ 의 (-)방향에 저항하도록 움직인다. 그림4에 표시한 속도분포에서 명확하게  $\frac{du}{dz}$ 의 값은 양쪽 경계면에서 반드시 같을 필요는 없다. 따라서 양 표면상의 마찰력은 다르다.  $\frac{du}{dz}$ 의 값은 유체의 물리적 특성과 축 표면의 종류, 형상, 속도 등에 의존한다.

## 2.2 윤활의 기초이론[1]

### 2.2.1 기초식

그림3을 참조하여 간단히 Z방향의 흐름이 없는 2차원흐름 및 밀도일정(비압축성)의 점성유체로 가정하면 연속의 식 :

$$-\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

힘의 평형식 :

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} (\eta \frac{\partial U}{\partial y}) = \eta \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad (8)$$

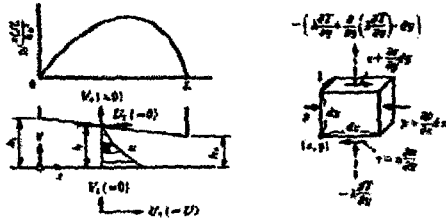


그림4. Pressure distribution in the slider bearing

압력  $P$ 를 지배하는 방정식 즉 Reynolds의 식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3 \partial P}{12 \eta \partial x} \right) = 6(U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 6h \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) + 12(V_2 - V_1) \quad (9)$$

여기서 식(9)는 「점성계수  $\eta$ 는  $y$ 에 따라 변화하지 않는다」는 가정을 포함하고 있는 점에 유의하기 바란다. 식(9)를  $x$ 에 관해 2회 적분하면 압력분포가 얻어진다. 적분정수를 구하는 경계조

건은 그림4의 경우는  $x=0$ 에서  $P=0$ 과  $x=L$ 에서  $P=0$ 이 된다.

### 2.2.2 열효과에 따른 윤활해석

유체 윤활에 관한 결론에는 그 근처에 하나의 원리가 있다.

그림3에서 압력은

$$\frac{dP}{dx} = 6\eta U \left( \frac{h-h^*}{h^3} \right) \quad (10)$$

$h$ 가 같은 값이므로

$$\frac{dP}{dx} = 0 \quad (11)$$

inlet을 통한 윤활유는 운동의 진행에 의해 열을 받아 온도가 올라감에 따라 점도는 떨어지고 유체의 체적이 증가함에 따라 제한된 체적내에서 압력이 증가된다. 여기에 축면 흐름을 무시하고 Reynolds Eq. 을 적용하면

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{dP}{dx} \right) = \frac{d}{dx} \left( \frac{\rho U h}{2} \right) \quad (12)$$

$x$ 에 관해 적분하면

$$\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{dP}{dx} = \frac{\rho U h}{2} + A \quad (13)$$

따라서

$$\frac{dP}{dx} = \frac{6\eta U}{h^2} + \frac{12A\eta}{\rho h^3} \quad (14)$$

$h$ 는 상수이므로 다시 한번 적분하면

$$P = \frac{6U}{h^2} \int \eta dx + \frac{12A}{h^3} \int \frac{\eta}{\rho} dx + B \quad (15)$$

여기서  $A, B$ 는 적분상수 그리고 점도( $\eta$ )와 밀도( $\rho$ )는 운동에 따른 온도상승에 따라 변하므로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\rho = \rho_i + \alpha_i(t - t_i) + \beta_i(t - t_i)^2 + \dots \quad (16)$$

여기서  $\rho_i$ 는 입구에서의 밀도를 나타내며 3번 제항 미만은 무시할 수 있을 정도의 작은 영향을 끼치므로

$$\rho = \rho_i + \alpha_i(t - t_i) \quad (17)$$

여기서 밀도와 온도와의 관계는 선형적이며 베어링에 따른 온도변화 역시 선형적으로 변한다. 그러므로 밀도변화는

$$\rho = \rho_i + \frac{x}{L}(\rho_o - \rho_i) \quad (18)$$

여기서  $\rho_o$ 는 출구에서의 밀도값이다.

점도의 경우 온도상승에 따른 저하와 체적의 상승에 따라 압력상승으로 인한 점도상승이 거의 상쇄 되므로 점도는 일정하다고 보면 식(18)에서

$\rho' = \rho_o / \rho_i$ 를 사용하면

$$\begin{aligned} P &= \frac{6\eta Lx}{h^2} + \frac{12A\eta}{\rho_i h^3} \int \frac{dx}{[1 + \frac{x}{L}(\rho' - 1)]} + B \\ &= \frac{6\eta Lx}{h^2} + \frac{12A\eta L}{\rho_i h^3(\rho' - 1)} \log_e [1 + \frac{x}{L}(\rho' - 1)] + B \end{aligned} \quad (19)$$

$x=0, x=L$ 에서  $P=0$ 이므로

$$A = \frac{-Uh\rho_i(\rho' - 1)}{2\log_e \rho'}, \quad B = 0$$

$$P = \frac{6\eta UL}{h^2} \left[ \frac{x}{L} - \frac{\log_e [1 + \frac{x}{L}(\rho' - 1)]}{\log_e \rho'} \right] \quad (20)$$

여기서

$$\rho' = 1 + \frac{\alpha_i}{\rho_i}(t_o - t_i)$$

팽윤에 대해

$$\begin{aligned} \alpha_i &\approx -0.00065/^\circ\text{C} \\ \rho_i &\approx 0.9\text{g/cm}^3 \end{aligned}$$

평행의 표면 베어링의 하중능력은 경사진 표면 베어링의 약  $\frac{1}{3.5}$ 이며 베어링에 있어 온도상승

$(t_o - t_i)$ 은 일반점밀기계 부품에서는  $100^\circ\text{C}$ 이하이며 대부분의 낮은 하중능력의 경우  $2\sim 20^\circ\text{C}$ 정도이다. 그러나 소성가공의 경우에는  $200\sim 450^\circ\text{C}$  정도까지 온도상승이 이루어지고 있다.

따라서 열 효과를 고려한 마찰계수는 유체 윤활의 경우 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\tau}{P} = \frac{\eta U}{Ph} = \frac{\eta U}{h} \frac{1}{\frac{6\eta UL}{h^2} \left[ \frac{x}{L} - \frac{\log_e [1 + \frac{x}{L}(\rho' - 1)]}{\log_e \rho'} \right]} \\ &= \frac{h}{6L} \frac{1}{\left[ \frac{x}{L} - \frac{\log_e [1 + \frac{x}{L}(\rho' - 1)]}{\log_e \rho'} \right]} \end{aligned} \quad (21)$$

## 2.3 마찰 수식 모델의 수치해석결과

### 1. 수치해석의 계산영역[3, 4]

압출가공의 계산은 알루미늄봉과 다이로 나눌 수 있다. 알루미늄봉은 직경 100mm, 길이 300mm로 하였으며, 다이부의 다이각은  $40^\circ$ 로 하였다. 계산영역은 그림7로 나타내었다.

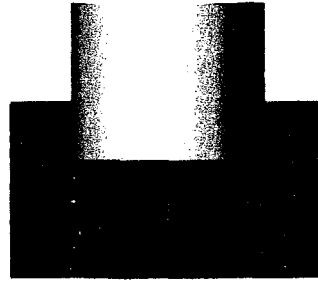


그림 5. 압출가공의 수치해석을 위한 계산영역

### 2. 압출가공의 경계조건

산출된 마찰계수를 적용한 압출가공의 해석을 위해 알루미늄봉에 대한 물성치를 Table 1에 나타내었다.

정 압 비 열	$C_p = 5.86 \times 10^5 \text{Nm/mm}^2 \text{kg}^\circ\text{C}$
밀 도	$\rho = 7.833 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$
속 도	$v = 8 \text{m/sec}$
온 도 변 화	$\Delta T = 20 \sim 270^\circ\text{C}$
응 력- 변 형 률	$\sigma = 527.9 \epsilon^{0.171} \text{N/mm}^2$
마 찰 계 수	$\mu = 0.2280$
윤 활 제 의 동 점 도	$\nu = 117.8 \text{cSt}$

Table 1. Property of Extrusion Process

### 3. 산출코드에 의한 마찰계수산출

마찰계수 산출을 위한 산출코드를 그림 6과 같이 작성하여 산출식에 의한 압출가공에 적용할 마찰계수를 산출하였다. 산출된 마찰계수는

0.2280이며, 이 값의 타당성을 위해 소성가공해석 코드인 ABAQUS/Standard모듈에 적용하였다.

구분	구분명	구분번호	구분명	구분번호	구분명	구분번호
1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	3
4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	5	5	5	5
6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8
9	9	9	9	9	9	9
10	10	10	10	10	10	10
11	11	11	11	11	11	11
12	12	12	12	12	12	12
13	13	13	13	13	13	13
14	14	14	14	14	14	14
15	15	15	15	15	15	15
16	16	16	16	16	16	16
17	17	17	17	17	17	17
18	18	18	18	18	18	18
19	19	19	19	19	19	19
20	20	20	20	20	20	20
21	21	21	21	21	21	21
22	22	22	22	22	22	22
23	23	23	23	23	23	23
24	24	24	24	24	24	24
25	25	25	25	25	25	25
26	26	26	26	26	26	26
27	27	27	27	27	27	27
28	28	28	28	28	28	28
29	29	29	29	29	29	29
30	30	30	30	30	30	30
31	31	31	31	31	31	31
32	32	32	32	32	32	32
33	33	33	33	33	33	33
34	34	34	34	34	34	34
35	35	35	35	35	35	35
36	36	36	36	36	36	36
37	37	37	37	37	37	37
38	38	38	38	38	38	38
39	39	39	39	39	39	39
40	40	40	40	40	40	40
41	41	41	41	41	41	41
42	42	42	42	42	42	42
43	43	43	43	43	43	43
44	44	44	44	44	44	44
45	45	45	45	45	45	45
46	46	46	46	46	46	46
47	47	47	47	47	47	47
48	48	48	48	48	48	48
49	49	49	49	49	49	49
50	50	50	50	50	50	50
51	51	51	51	51	51	51
52	52	52	52	52	52	52
53	53	53	53	53	53	53
54	54	54	54	54	54	54
55	55	55	55	55	55	55
56	56	56	56	56	56	56
57	57	57	57	57	57	57
58	58	58	58	58	58	58
59	59	59	59	59	59	59
60	60	60	60	60	60	60
61	61	61	61	61	61	61
62	62	62	62	62	62	62
63	63	63	63	63	63	63
64	64	64	64	64	64	64
65	65	65	65	65	65	65
66	66	66	66	66	66	66
67	67	67	67	67	67	67
68	68	68	68	68	68	68
69	69	69	69	69	69	69
70	70	70	70	70	70	70
71	71	71	71	71	71	71
72	72	72	72	72	72	72
73	73	73	73	73	73	73
74	74	74	74	74	74	74
75	75	75	75	75	75	75
76	76	76	76	76	76	76
77	77	77	77	77	77	77
78	78	78	78	78	78	78
79	79	79	79	79	79	79
80	80	80	80	80	80	80
81	81	81	81	81	81	81
82	82	82	82	82	82	82
83	83	83	83	83	83	83
84	84	84	84	84	84	84
85	85	85	85	85	85	85
86	86	86	86	86	86	86
87	87	87	87	87	87	87
88	88	88	88	88	88	88
89	89	89	89	89	89	89
90	90	90	90	90	90	90
91	91	91	91	91	91	91
92	92	92	92	92	92	92
93	93	93	93	93	93	93
94	94	94	94	94	94	94
95	95	95	95	95	95	95
96	96	96	96	96	96	96
97	97	97	97	97	97	97
98	98	98	98	98	98	98
99	99	99	99	99	99	99
100	100	100	100	100	100	100

그림 6. 산출코드(PFA)에 의한 마찰계수 산출

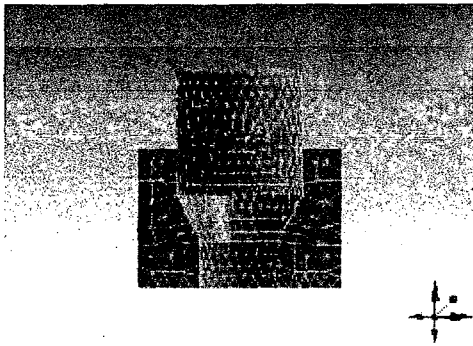


그림 7. SolidWorks와 HyperMESH를 이용한 전처리

#### 4. 산출 마찰계수를 적용한 압출가공 해석

산출코드에 의해 산출된 마찰계수 0.2280을 적용한 압출가공을 해석하였다. 알루미늄봉은 직경 100mm, 길이 300mm로 하였으며, 다이각은 40°로 하였고, 전처리는 SolidWorks를 사용하여, HyperMESH를 이용하여 격자생성을 하였으며 그림 8에 나타내었으며, ABAQUS/Viewer모듈을 이용한 전처리를 그림8에 나타내었다.

처리과정은 ABAQUS/Standard모듈을 사용하였으며, 후처리는 ABAQUS/Viewer모듈을 사용하였고 결과로는 열발생에 의한 열분포는 그림 9와 폰미세스(Von Mises) 결과는 그림 10에 각각 나타내었다.

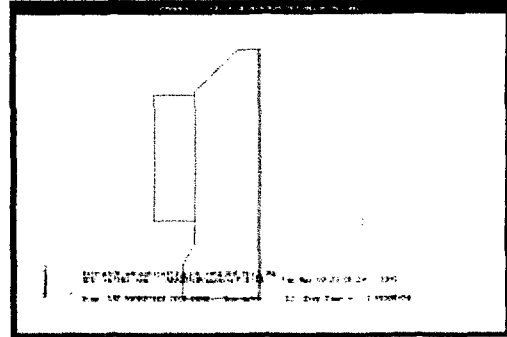


그림 8. ABAQUS/Viewer모듈을 이용한 전처리

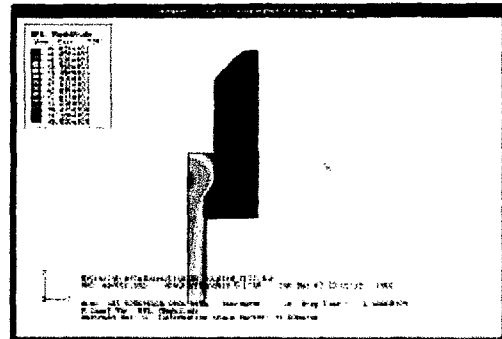


그림 9. 압출가공에 의한 열발생분포

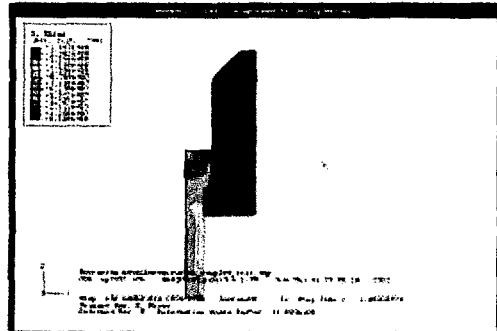


그림 10. Von Mises 결과

### 3. 결 론

압출(Extrusion)에 있어서 재료의 변형은 재료와 공구 금형 가공시에 사용되는 유효방법에 커다란 영향을 받는다. 특히 압출(Extrusion) 한계 및 주름살의 발생조건에 증대한 영향을 끼치며 압출(Extrusion) 조건, 형상 등에 따라 크게 다르다. 현재까지 현장에서 사용하는 일률적인 마찰계수

적용을 탈피하고 적절한 마찰계수를 적용함으로써 효과적인 윤활방법을 가공에 적용하여 보다 나은 소성가공 생산 기술을 확립할 수 있다.

본 마찰계수 산출 수식 모델은 다음과 같은 경우의 문제를 해결하는데 크게 이바지 할 수 있다.

1. 유체 윤활영역의 평행표면 배아령의 온도 측정식을 개발하여 사용하는 경우 실험치와 잘 일치하는 마찰계수를 얻을 수 있음(Ironing 및 deepdrawing 등의 경우 정확한 마찰계수를 얻을 수 있었음)

2. 마찰계수의 산점으로 인해 압출을 위한 최대 압출 압력, 윤활유 선정, 프레스 행정 속도 등을 최적의 상태로 조정할 수 있게 되어 경제적인 압출(Extrusion)가공이 가능함.

위와 같이 적정 마찰계수를 선택 적용함에 따라 소성가공의 윤활조건을 효과적으로 적용할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 앞으로 2차년도에 소재와 공구 사이의 표면 조도등을 고려한 마찰 계수를 구하는 마찰계수산출 수식 모델을 개발할 계획이며 본 모델의 활용을 위한 실험적 검증 연구 등이 계속 필요 할 것으로 사료된다.

### 감 사

본 연구논문은 에너지관리공단의 에너지기술학술진흥사업(2001.5~2003.4)의 일화에 의한 재정지원에 의해 이루어졌음을 밝힙니다.

### 참 고 문 헌

1. 오박균, 2002, "기계부품 접촉구동부의 에너지 절약형 마찰치리수식모델개발", 에너지관리공단 연구보고서
2. 오박균 외 2인, 2002, "압출성형을 위한 마찰수식모델에 관한 연구", 한국자동차공학회, 2002년도 생산기술부문 학술강연 및 발표논문집, pp109-115
3. Park kyoun Oh, 1999, "A study on the Numerical Fiction Model Development For the Deep Drawing", KSME Chung chung

Province Fall conference proceeding, pp142-151

4. J. Halling, 1978, "Principles of Tribology", Macmillan Press Ltd., P237

5. G. D. S MacLellan, 1948 " J. Iran & Steel Inst." 158, P347

6. ABAQUS, 2001, User's Manual/ Standard/ POST, HKS

7. Hypermesh, 2001, user's Manual. Altari Computing