

금형의 표면정도와 가공방향에 따른 판재의 마찰특성

김동환^{*}, 김병민^{**}, 오세욱^{***}, 박춘달^{***}, 황지선^{***}
(2000년 8월 31일 접수)

Friction Characteristics of Sheets for The Surface Finish and The Stoning Directions of The Dies

Dong-Hwan Kim, Byung-Min Kim, Se-Wook Oh, Chun-Dal Park and Ji-Seon Hwang

Key Words : Coefficient of Friction(마찰계수), Stoning Directions(다듬질 방향), Die Roughness(금형 거칠기), NN(신경망), Orthogonal Array(직교배열)

Abstract

This paper investigates the combined effects of parameters such as die surface finish, die directionality of stoning, contact pressure and draw speed on the resulting coefficient of friction. Also, this study show the correlation between the NN (Neural Network) and DOE(Design of Experiments) to reduce the number of experiments without the loss of the effects of parameter upon coefficient of friction. The experiments were run in random order with at least three replicates. It was found that the directional stoning orthogonal to the pulling direction is lower friction than directional stoning parallel to the pulling direction on using FCD55 die and SPCEN

기호설명

- μ_{ave} : 평균마찰계수
- SF : 스코링 계수(Scoring Factor)
- P_{mit} : 마찰측정구간(TMS)의 초기하중
- S/N : 신호 대 잡음(Signal to Noise)
- y_i : 특성치(Characteristics)

1. 서론

자동차 회사에서는 강판재의 성형에 관련한 문제들이 많은 부분을 차지하며, 제품에 따라 그 성형 형태도 다양하다. 특히, 스탬핑 공정 중에 복잡한 경계조건하에서 판재가 받는 변형은 기본적으로 장출변형, 드로잉변형, 굽힘변형과 장출플랜지 변형 그리고 이러한 변형의 조합으로 나타나고, 이런 변형 하에서 재료의 결합 없는 성형 여부가

큰 관심사이다. 자동차 강판의 스탬핑 공정은 연속 프레스 공정으로 판넬 형상의 결정을 위한 드로잉 공정과 후속공정을 행하고 있다. 특히, 판재의 체적에 비하여 금형과 판재의 접촉면적이 큰 프레스 공정이므로 마찰력의 크기가 판재의 스탬핑 성형성(Stamping Formability)에 큰 영향을 미친다.^(1,2)

최근에 자동차 차체의 내식성 향상을 위하여, 아연도금강판 등 각종 표면처리강판이 개발되고 광범위하게 적용되어 왔다. 그러나, 공구, 재료간의 트라이볼로지(Tribology) 특성이 프레스 성형에 강한 영향을 미치므로 마찰특성을 조사하는 일은 매우 중요하다. 마찰특성은 크게 재료에서 기인되는 인자, 예를 들면 강판의 도금 종류, 표면 거칠기 그리고 기계적성질 등과 성형조건에서 기인되는 인자, 예를 들면 접촉면압, 속도 등의 상호작용에 의해 그 특성이 달라진다. 하지만, 지금까지의 연구는 특정조건에만 국한시켜 보고 되었으며, 특히 소재 재질의 성형성 향상에 그 연구가 집중되었다. 이러한 방식의 대책수립에는 한계가 있음이 밝혀지고 있으므로, 보다 광범위한 연구가 필요하다. 일반적으로, 상대운동을 하는 두 면 사이에는

^{*} 회원, 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
^{**} 회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터
^{***} ㈜현대자동차 금형기술개발팀
 E-mail : bmkim@hyowon.pusan.ac.kr
 TEL : (051)510-2319 FAX : (051)514-7640

항상 마찰이 작용하고, 과도한 마찰과 마멸에 의해 제품특성에 손상이 발생할 수 있다. 재료의 마찰과 마멸현상은 재료 고유의 물성이 아닌 트라이보-시스템(Tribo-System)의 특성이므로, 재료의 마찰을 측정하고 그 현상을 완전히 이해하는 것은 어렵다. 트라이보-시스템의 변수에는 운동의 형태, 하중이나 접촉압력, 미끄럼 속도 및 온도와 같은 작동변수(Operating Variables)와 재료의 조직, 화학적 구성, 윤활유 및 표면상태와 같은 단일변수(Simple Parameters)가 있다. 그 중 표면상태는 다양한 방법에 의해 생성되고, 표면형상(Surface Profile)에 따라 마찰특성이 달라진다. 즉, 표면 형상은 마찰특성에 영향을 미치는 주요 원인 중의 하나이다.

표면 거칠기(Surface Roughness) 변화가 마찰 및 마멸에 미치는 영향에 대하여 이론적 및 실험적 연구가 많이 진행되어 왔다. Staph⁽³⁾ 등은 매끈한 표면은 계면 사이에 이 물질이 들어가기 어렵기 때문에 매끈한 표면일수록 마찰특성이 우수하다고 하였다. 반면, Martz⁽⁴⁾ 등은 거친 표면은 돌기 사이에 오일을 공급하고 먼지나 마멸 입자들의 돌출구 작용을 하기 때문에 거친 표면일수록 마찰특성이 좋은 영향을 미친다고 하였다. 한편 Kang⁽⁵⁾ 등은 거친 표면 또는 매끈한 표면보다는 중간 정도의 거칠기를 가진 표면이 윤활 특성에 더 좋은 효과를 보인다고 하였다. Bossler⁽⁶⁾ 등은 적당한 표면 거칠기를 형성하는 것이 윤활유 Pocket 효과를 증대시키므로 매끈한 표면보다는 윤활 상태가 좋으며, 또한 불연속면에 형성되는 윤활막은 윤활유 두께가 감소함에 따라 경직화(Stiffening) 효과를 증대시켜 준다는 가설을 세웠다. 지금까지 많은 연구결과, 고체간의 접촉시 발생하는 마찰현상은 재료의 성질과 그 표면상태에 따라 크게 좌우된다는 일반적인 결론은 도출되었으나, 아직 마찰현상에 대한 기본적인 이론 또는 해석이 명확하게 정립되지 않고 있다.

판재성형에 있어서 성형성 및 성형난이도의 사전평가를 위해 유한요소법(FEM)을 중심으로 성형 시뮬레이션이 적극적으로 추진되고 있다. 성형 시뮬레이션은 성형공정중의 피가공재의 변형거동을 응력-변형률, 형상의 변화에 관하여 엄밀하게 해석하는 것으로 성형한계와 이에 대응하는 성형여부를 판단하는 것을 목적으로 한다. 컴퓨터의 고성능화로 성형 시뮬레이션의 이용환경은 친근한 것이 되었다. 해석용 프로그램의 개발도 활발히 진행 중이며, 실제에 주어진 성형 시뮬레이션은 현실의 경우와 잘 일치한다. 성형 시뮬레이션에 있어서 피가공재의 재료특성과 마찰특성은 중요한 입력데이터이다. 예를 들어 마찰계수(μ)의 변화가

응력분포, 변형률분포의 계산결과에 큰 변화를 야기시킨다. 따라서 보다 높은 정도의 실용적인 성형 시뮬레이션으로 마찰특성의 정식적인 표현이 필요하며, 이 때문에 마찰특성에 관련한 데이터베이스의 구축은 중요한 과제이다.

본 연구의 목표는 금형의 관점에서 마찰 및 판넬 성형성에 미치는 금형의 표면정도의 특성을 파악하여 성형에 적합한 금형의 표면상태를 제시하고자 한다. 또한 이론해석을 위하여 마찰실험시 소재의 인출속도와 금형과 소재간의 접촉면압을 변화시켜 마찰특성을 평가하였으며, 금형 표면의 표면정도와 가공방향이 판재의 마찰특성에 미치는 영향을 알아보았다. 보다 효율적인 연구를 위하여 본 연구에서는 다구찌 방법과 신경망⁽⁷⁾을 이용하여 최소의 실험으로 금형 특성, 인출속도, 접촉 면압이 마찰특성에 미치는 영향과 금형의 가공방향이 마찰특성에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구에서는 FCD55 금형과 SPCEN 소재에 대하여 평판 마찰실험(Straight Pulling Friction Test)을 수행하였다.

2. 마찰계수의 측정

박판성형에서 취급하는 계면에서의 접촉문제는 주로 미끄럼 마찰이다. Fig. 1에 도시된 바와 같이 금형과 피가공물 계면에 수직으로 작용하는 힘을 N , 계면에 평행하게 작용하는 힘을 P 라 하면 마찰계수, μ 는 아래의 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\mu = \frac{P}{2 \times N} \quad (1)$$

여기서, N 은 수직하중(Clamping Force)이며, P 은 소재를 당기는 하중(Pulling Force)이다.

본 연구에서는 아래의 평균 마찰계수 계산식을 이용하여 마찰측정을 하였다.

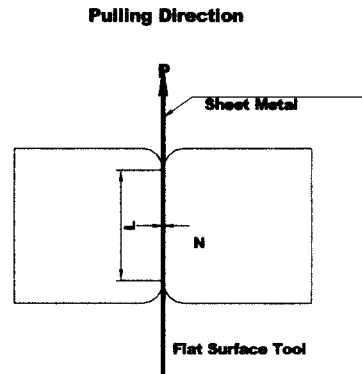


Fig. 1 Schematic view of straight pulling friction test

$$\mu_{ave} = \frac{\sum_{n=1}^K \mu_n}{K} = \frac{\sum_{n=1}^K \frac{P_n}{2 \times N}}{K} \quad (2)$$

여기서, K는 마찰측정구간에서 측정된 인출력의 수를 나타낸다.

스코링 계수(Scoring Factor)는 마찰실험 중 접촉면의 향상 또는 악화를 판정하는 계수로 마찰측정시 변위의 이동에 따른 초기하중에 대한 측정하중의 변화량을 나타내며 아래와 같이 계산된다.

$$SF = \frac{P}{P_{init}} \quad (3)$$

하중곡선을 분석하는 부분은 하중이 정상상태(Steady State)를 유지하는 구간(Test Measurement Segment)⁽⁸⁾에 한하여 측정한다.

Fig. 2에 100mm 인출 구간에서 하중 분석 구간을 나타내었다. 본 연구에서 하중분석은 20mm ~ 80mm 구간에서 측정되었다.

SF의 값의 변동은 아래와 같이 분류된다.

SF=1 : 마찰이 일어나는 동안 접촉면의 무변화

SF>1 : 마찰이 일어나는 동안 접촉면의 악화

SF<1 : 마찰이 일어나는 동안 접촉면의 향상

If 0.9<SF< 1.2 : SF=1(접촉면의 무변화)-No Scoring

평균 SF 값의 계산은 아래의 식 (4)와 같다.

$$SF_{ave} = \frac{\sum_{n=1}^K SF_n}{K} = \frac{\sum_{n=1}^K \frac{P_n}{P_{init}}}{K} \quad (4)$$

식 (4)의 평균 스코링 계수를 계산하여 금형과 소재의 접촉면의 변화 (무변화, 악화, 향상)을 판단한다.

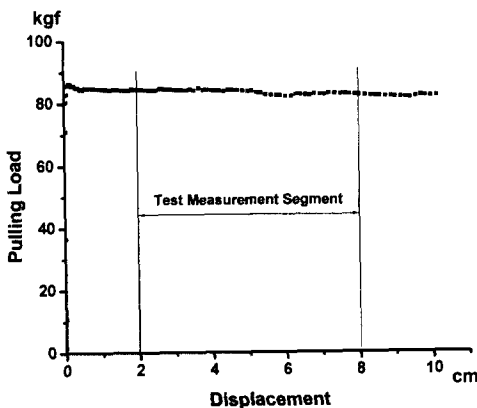


Fig. 2 The region of friction measurement

3. 신경망과 다구찌 방법

제품 및 공정의 설계단계에서 실험의 측정데이터, 즉 특성치(Characteristics)가 수반하는 오차는 참 값으로부터의 치우침과 데이터의 편차로 나누어지는데, 편차로 인한 오차는 그 수정이 매우 어렵다.⁽⁹⁾ 따라서 특성치의 편차가 심한 제품은 품질이 낮다고 말할 수 있으며, 이 편차의 정도를 나타내는 지표로서 다구찌는 S/N 비(Signal To Noise Ratio)라는 개념을 도입하여 생산공정에 적용하였다.^(10,11) 본 연구에서 고려한 망소특성식(LB: Lower is Better)은 아래의 식 (5)와 같다.

$$S/N_{LB}(n) = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r y_i^2 \right) \quad (5)$$

여기서, r은 동일설계변수조합에서 잡음인자를 고려한 실험 횟수이며 n은 설계변수조합으로 수행한 실험 횟수를 나타낸다. y는 특성치를, 그리고 첨자 i는 동일설계변수조합에서 잡음인자를 고려한 실험 번호를 나타낸다.

직교배열표에 따라 설계된 설계변수조합으로부터 최적의 변수조합을 구하기 위하여 다구찌 방법으로 변환된 S/N 비를 신경망 학습의 목적값(Target Value)으로 사용하였다. 신경망은 비선형 문제, 형상분류, 제어 등의 분야뿐만 아니라 함수근사까지 그 응용범위가 상당히 넓다. 본 연구에서는 감독학습의 역전파 학습알고리즘을 이용하여 목적값과 학습으로 계산된 실제 출력값과의 차(RMS: Root Mean Square Error)를 줄여 나갔다.

신경망은 다음과 같은 특성을 가지고 있다. (1) 비 선형 입·출력에 대한 사상(Mapping)이 가능, (2) 새로운 입력 패턴에 대한 신속한 응답성, (3) 자체 능력을 최적화 하기 위해 자동적으로 연결가중치(Connection Weights) 및 심지어 구조(Neuron or Connection Type)의 조절이 가능한 제어기, 예측기, 패턴 인식기의 역할 그리고 (4) 데이터의 분산 저장 방식으로 뉴런 및 연결 강도가 일부 손상을 입더라도 그 능력이 완만히 감소하는 결합 허용 시스템(Fault-Tolerant System)이다.⁽¹²⁾ 본 연구에서는 이전의 연구에서 개발된 신경망 프로그램(BPMSE1)을 이용하였다.⁽¹³⁾

신경망의 능력을 최대한 살리기 위해서는 신경망 학습데이터의 선정에 주의를 기울여야 한다. 학습데이터에 따라 그 결과의 정확도가 달라질 수 있으며 정확한 해석을 위해서는 많은 학습데이터를 필요로 하기 때문이다. 실험계획법만으로 공정설계를 수행할 때에도, 변수 수준간의 폭이 좁아

야 하며 전문가적 지식이 요구된다는 제약이 따른다. 이러한 실험계획법과 신경망이 가지는 단점을 보완하고 장점만을 살려 보다 신속히 최적의 설계 변수조합을 얻기 위하여 실험계획법에서 사용된 직교배열표를 신경망의 학습데이터로 사용할 수 있도록 하였다. 이렇게 함으로써, 시뮬레이션 횟수를 줄이는 동시에 많은 학습효과를 얻을 수 있고, 전문가적 지식이 없어도 설계변수 수준을 잡는데 큰 어려움이 없다. 그리고 특별한 데이터 해석이 없어도 최적의 변수조합을 선정할 수 있으므로 해석시간을 줄일 수 있으며, 학습되지 않은 설계변수조합의 특성치까지도 예측할 수 있으므로 설계변수의 다수준 영역에서 특성치에 미치는 영향을 파악하는 효과를 얻을 수 있다.^(13,14) 학습에 사용된 신경망 프로그램은 은닉층 수와 뉴런 수에 제한을 두지 않으나 학습의 속도를 고려하여 입력층과 출력층을 포함한 4 층 구조로 수행하였고, 가공정에 따라 은닉층의 뉴런 수 변경이 용이하도록 하였으며, RMS 오차는 10^{-7} 으로 하였다.

4. 실험

4.1 금형의 표면 거칠기 측정

금형 거칠기에 따른 마찰특성 실험을 수행하기 위하여 실제 현장에 적용되고 있는 자동차 SIDE OUT 금형의 표면 거칠기를 측정하였고, Fig. 3에 거칠기 측정 부위를 나타내었다. 측정된 거칠기는 $0.06 \pm 0.1\mu\text{m}(Ra) \sim 1.39 \pm 0.1\mu\text{m}(Ra)$ 이었다. Table 1에는 Fig. 3의 자동차 SIDE OUT 각 부위별 측정된 거칠기(Ra :평균거칠기, $Rmax$:최대거칠기)를 나타내었다.

4.2 실험조건

실험에 사용된 시편은 냉간압연강판(SPCEN)이며 인장실험을 수행하여 기계적특성을 Table 2에 나타내었다. 시편은 실험의 정확성을 위하여 부식, 스크래치 그리고 버(Burr)가 없는 건전한 시편만을 사용하여 3회 반복실험을 원칙으로 하였다. 본 연구에 사용된 냉간압연강판의 시편은 압연방향에서 추출하였다. 시편 추출 방향에 따른 표면 거칠기의 변화는 미소하였으며 방향별 평균 표면 거칠기, Ra 는 $1.3\mu\text{m}$ 이다.

4.2.1 금형 및 시편준비

금형의 표면가공상태 및 다듬질방향에 따른 마찰특성을 평가하고자, Table 3의 조건으로 시편의 인출방향과 금형가공방향이 (1) 수평인 경우와 (2)

수직인 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 여기서 M(Machining)은 기계가공 상태를 뜻하며, S(Stoning)는 다듬질 된 금형을 뜻한다. 금형은 볼직경 30mm 을 이용하여 회전수 600rpm, 피드(Feed) 3000mm/s, 피치(Pitch) 0.7mm, 깊이 0.3mm의 가공조건으로 블엔드밀 가공하였다. 금형의 기계가공방향은 마찰실험시 소재 인출방향에 수직방향으로 가공하였다.

다듬질의 정도에 따라 S1 과 S2 로 구분하였으며, S1 은 $0.6 \pm 0.1\mu\text{m}(Ra)$, S2 는 $0.1(-0.02, +0.1)\mu\text{m}(Ra)$ 거칠기를 갖도록 하였다. 소재는 50x400mm 로 준비하였으며 수직압력은 10, 20, 30kgf/cm² 에서 고려하였다. 소재의 마찰시험시 소재의 인출속도는 1, 15, 30mm/sec 에서 고려하였다. 금형과 소재의 접촉면적은 $(57 \times 50)\text{mm}^2$ 이다. Fig. 1의 수직력(N)은 285kgf, 570kgf, 855kgf 의 세가지 하중에서 실험하였으며 윤활은 무윤활 상태이다. Table 4에는 시험에 사용된 기계가공상태와 다듬질정도에 따른 금형표면의 거칠기 값을 나타내었다. 거칠기 측정은 휴대가 가능한 SJ201(Mitutoyo사, 측정길이 8mm)를 이용하였다.

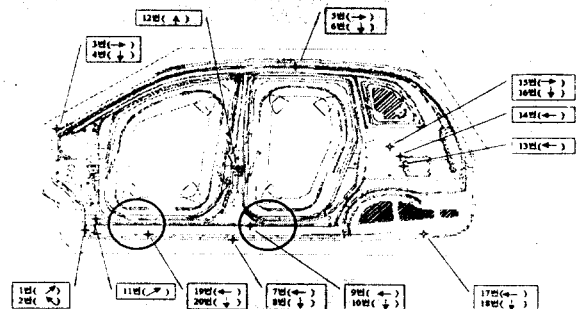


Fig. 3 Roughness measurement point in side out

Table 1 Roughness of measurement point in side out

Measurement point	Ra (μm)	Rmax (μm)	Measurement point	Ra (μm)	Rmax (μm)
1	0.22	1.21	11	0.21	1.39
2	0.27	3.17	12	0.18	1.95
3	0.26	1.60	13	1.35	6.11
4	0.49	2.59	14	1.20	7.03
5	0.55	3.28	15	0.35	2.26
6	0.81	4.66	16	0.86	5.07
7	0.51	3.83	17	0.13	1.34
8	0.92	7.42	18	0.27	1.23
9	0.06	0.50	19	0.21	1.47
10	0.37	2.63	20	1.39	8.92

마찰시험용 금형의 다듬질방향을 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 5 에는 각 금형별 거칠기를 인출방향과 수직방향으로 측정하여 그 값을 나타내었다. Fig. 5 에서 다듬질방향의 거칠기는 다듬질 방향의 수직 방향에 비해 약 0.1 μm (Ra) 적음을 알 수 있다.

실험의 신뢰성 확보를 위하여 금형의 평면도를 측정하고 평면도가 나오는 금형만을 선별하여 실험을 수행하였다. 평면도 시험은 금형을 마찰시험 장치에 장착하여 금형 사이에 흰 종이를 끼우고 일정 면압, 10kgf/cm² 으로 가압한 후, 흰 종이에 묻어 나오는 금형면 형상으로 판단하였다. Fig. 6 에 시험에 사용된 금형의 평면도를 나타내었다.

4.2.2 실험장치

본 연구에서는 평면마찰시험을 수행하여 금형의 마찰거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 평면 마찰시험을 위해 제작된 마찰금형과 가압기를 U.T.M(Universal Testing Machine)에 장착하여 마찰 시험을 수행하였다(Fig. 7).

Table 2 Mechanical property of SPcEN

RD	YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	El (%)	n	r	K (kgf/mm ²)
0°	18.00	31.40	43.83	0.223	2.23	55.16
45°	19.10	32.70	38.67	0.215	1.48	56.89
90°	18.43	31.10	42.67	0.216	2.50	54.14
Avg.	18.51	31.73	41.72	0.218	1.92	55.40

Table 3 The experiment condition of friction test

Die (FCD55)	M	S1 (H,O)	S2 (H,O)
Holding pressure (kgf/cm ²)	10	20	30
Pulling velocity (mm/sec)	1	15	30
Specimen size	50mm x 400mm		
Die contact area	57mm x 50mm		
Lubricant	No		

*H: Directional Stoning Parallel to the Pulling Direction
 O: Directional Stoning Orthogonal to the Pulling Direction

Table 4 Roughness values of die surface finishes

No	Surface preparation	Estimation direction of die roughness	Ra(μm)	Rmax(μm)	Rz(μm)	Rq(μm)	
1	Machining	M	Pulling direction	1.55	9.37	6.75	2.24
		Vertical direction	1.84	11.13	9.25	2.24	
2	Horizontal Stoning	HS1	Pulling direction	0.64	3.41	2.84	0.87
		Vertical direction	0.79	6.43	3.98	1.62	
3	Horizontal Stoning	HS2	Pulling direction	0.10	0.93	0.45	0.13
		Vertical direction	0.11	1.23	0.79	0.68	
4	Orthogonal Stoning	OS1	Pulling direction	0.81	6.56	4.39	1.61
		Vertical direction	0.62	4.44	2.95	0.92	
5	Orthogonal Stoning	OS2	Pulling direction	0.12	1.20	0.80	0.66
		Vertical direction	0.09	0.82	0.47	0.12	

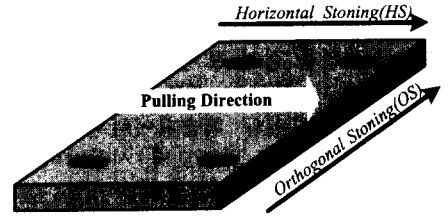
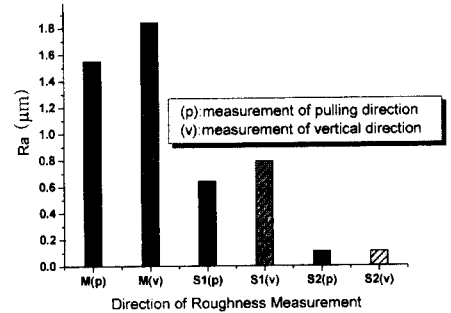
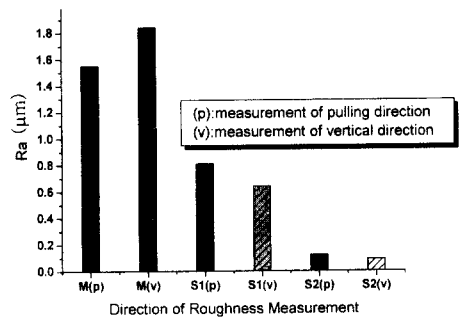


Fig. 4 Stoning direction of die



(a) The stoning direction parallel to the pulling direction



(b) The stoning direction orthogonal to the pulling direction

Fig. 5 Roughness measurement of test dies

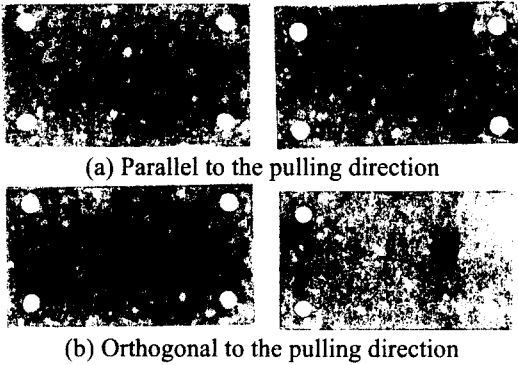


Fig. 6 Stoning direction and flatness of die



Fig. 7 Friction test apparatus-U.T.M

4.3 실험방법

4.3.1 변수수준결정

금형의 표면특성과 접촉면압 그리고 인출속도를 변수로 하여 각 설계변수의 변수범위, 즉 변수 수준(Level)을 Table 5 에 나타내었다. 금형의 표면가공상태는 현재 적용되는 있는 Fig. 3 의 자동차 SIDE OUT 금형의 측정된 표면 거칠기 범위에서 결정하였다. 정확한 표면 거칠기값은 얻기가 어려우므로, 본 연구에서는 금형 표면 거칠기의 변동(Ra:±0.1µm)을 고려하여 이를 잡음인자로 설정하였다. 이에 반복실험을 수행하여 평판마찰실험의 마찰계수측정에 정확도를 기하였다.

4.3.2 실험계획

각 변수가 마찰에 미치는 영향을 파악하고 동시에 실험의 횟수를 줄이기 위하여 직교배열표의 형식에 따라 내측배열(Inner Array)에 설계변수를 설정하고 마찰실험을 수행하였다. 사용된 직교배열표는 라틴방격법에 따른 L₉3⁴ 형식을 이용하였으며,

Table 5 The levels of design and noise factor

Design Parameters	Levels		
	0	1	2
A: Die (FCD55) surface finish	M	S1	S2
B: Pressure (kgf/cm ²)	10	20	30
C: Speed (mm/s)	1	15	30
Noise Factor	0		1
Roughness variation	+0.1		-0.1

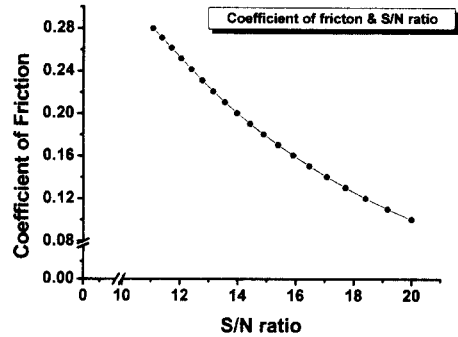


Fig. 8 Relation of S/N ratio and coefficient of friction

여기서 하첨자 9 는 실험횟수, 상첨자 4 는 배치 가능한 인자수 그리고 3 은 인자의 수준 수를 나타낸다. 잡음인자를 외측배열(Outer Array)에 배치하여 잡음인자인 금형 거칠기의 변동을 고려하였다. 사용된 L₉3⁴ 형식의 직교배열표를 Table 6 에 나타내었다. 본 연구에서는 아래와 같이 두 가지로 실험을 분류하였다.

1) 가공방향이 인출방향과 동일한 경우(OA1)

FCD55 금형을 소재 인출방향과 수직으로 기계 가공(M)한 상태와 금형 가공방향을 소재 인출방향과 동일하도록(Fig. 4) Table 4 의 HS1, HS2 의 금형상태로 가공하고, 접촉압력 10, 20, 30 kgf/cm², 인출속도 1, 15, 30mm/s 범위에서 Table 6 의 직교배열표 형식에 따라 실험한다.

2) 가공방향이 인출방향에 수직인 경우(OA2)

FCD55 금형을 소재 인출방향과 수직으로 기계 가공(M)한 상태와 금형 가공방향을 소재 인출방향에 수직하게(Fig. 4) Table 4 의 OS1, OS2 의 금형상태로 가공하고, 접촉압력 10, 20, 30 kgf/cm², 인출속도 1, 15, 30mm/s 범위에서 Table 6 의 직교배열표 형식에 따라 실험한다.

금형 특성, 접촉면압 그리고 인출속도의 3 가지 설계변수가 각각 3 수준의 값을 가지므로 모든 경우에 대하여 실험을 실시한다면, 총 27 번(3x3x3)의 실험을 수행하여야만 한다. 본 연구에서는

Table 6 The OA table (1) - the results of friction test in the directional stoning parallel to the pulling direction

Trial no.	INNER ARRAY				OUTER ARRAY		
	Column number and Control Parameters				Noise Factors		
	Die roughness	Pulling Velocity	Contact Pressure	-	Roughness Variation of Dies		S/N
					0	1	
1	2	3	4	Coefficient of friction (μ)(SF)			
1	0	0	0	0	0.284(0.976)	0.281(0.972)	10.979
2	0	1	1	1	0.208(0.970)	0.194(0.969)	13.930
3	0	2	2	2	0.186(0.976)	0.167(0.984)	15.025
4	1	0	1	2	0.153(0.998)	0.150(0.990)	16.391
5	1	1	2	0	0.135(0.988)	0.130(0.997)	17.554
6	1	2	0	1	0.165(0.994)	0.161(0.952)	15.755
7	2	0	2	1	0.144(0.980)	0.140(1.001)	16.953
8	2	1	0	2	0.187(1.020)	0.170(0.996)	14.957
9	2	2	1	0	0.145(1.011)	0.143(0.999)	16.832

Table 7 ANOVA (1) table of in the directional stoning parallel to the pulling direction

Parameters (Column number in OA)	Average S/N value in level			Sum of Square	Number of Freedom	Mean Square	S'	F ratio (%)
	0	1	2					
Die roughness (1)	39.9628	49.7010	48.7433	19.205	2	9.602	18.113	17.59†(56.2)
Pulling velocity (2)	44.3242	46.4423	47.6406	1.880	2	0.94		
Contact pressure (3)	41.6925	47.1546	49.5600	10.836	2	5.418	9.744	9.92‡ (30.3)
Error (4)	45.3662	46.6397	46.4013	0.306	2	0.153		
Ep (pulling velocity)				2.186	4	0.546	4.370	(13.5)
Total				32.227	10			(100)

가공 방향에 따라 두 개의 직교배열표(OA1, OA2)를 이용하여 실험해야 하므로 총 54 번의 실험을 수행하여야만 한다. 그러나 Table 8 의 직교배열표를 이용하면 각각 9 번의 실험만으로 전체의 효과를 볼 수 있고, 마찰계수에 미치는 변수의 영향을 판단할 수 있으므로 효율적인 실험 방법이다.

5. 마찰실험결과 및 고찰

5.1 금형가공방향에 따른 변수영향 평가

5.1.1 가공방향이 소재인출방향과 수평일 때

직교배열표(OA1)에 따라 금형의 가공방향과 소재인출방향이 동일한 경우 평판마찰실험을 수행하고 각 경우에 대한 마찰계수와 스코링계수를 구하여 Table 6 에 나타내었다. Table 6 의 1~9 번 까지 각 설계변수조건에 따라 평판 마찰실험을 수행하였다. 또한 특성치의 명확성을 위하여 잡음인자를 고려한 반복실험을 수행하여 동일한 변수조합이 갖는 마찰계수를 다구찌 방법의 S/N 비로 변환하였다. 마찰계수(μ)와 S/N 비와의 관계는 Fig. 8 과 같다. S/N 비는 동일조건에 대한 특성치를 하나의 값으로 변환하고, 특성치의 실제값을 보다 명확히 나타내는 특징을 가진다. S/N 값은 클수록 특성치에 좋은 영향을 미치는 조건이며, S/N 비가 클수록

마찰계수는 낮은 조건이다.

금형특성, 접촉면압, 인출속도가 SPEN 소재의 평판마찰특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 분산분석(ANOVA: Analysis of Variation) 하여 그 결과를 Table 7 에 나타내었고 Fig. 9(a)에 각 변수의 각 수준별 평균 S/N 비를 점추정방법으로 나타내었다. S/N 비가 클수록 마찰계수는 낮으므로 각 변수의 수준에서 S/N 비가 가장 큰 조건은 금형 거칠기가 1 수준, 인출속도가 2 수준, 접촉압력이 2 수준일 경우이다. 특히 금형 거칠기는 Table 7 에서 알 수 있듯이, 마찰계수에 미치는 영향이 아주 크며(기여도 56.2%) 그 다음으로 접촉압력(기여도 30.3%) 이다. 인출속도가 마찰계수에 미치는 영향은 미소하므로 오차함에 풀링(Pooling; 오차로 간주) 시켜 변수의 기여도를 계산하였다. 인출속도가 마찰계수에 미치는 영향은 미소하나, 점추정에서 얻을 수 있는 결과는 속도가 빠를수록 마찰계수는 낮아짐을 알 수 있었다.

5.1.2 가공방향이 소재인출방향과 수직일 때

직교배열표(OA2)에 따라 소재인출방향에 수직으로 금형을 가공하여 평판마찰실험을 수행하고 각 경우에 대한 마찰계수와 스코링계수를 구하여 Table 8 에 나타내었다. Table 8 의 1~9 번 까지 설계

Table 8 The OA table (2) - the results of friction test in the directional stoning orthogonal to the pulling direction

Trial no.	INNER ARRAY				OUTER ARRAY		
	Column number and Control Parameters				Noise Factors		
	Die roughness	Pulling Velocity	Contact Pressure	-	Roughness Variation of Dies		
	1	2	3	4	0	1	S/N
					Coefficient of friction (μ)(SF)		
1	0	0	0	0	0.280(1.000)	0.250(9.918)	11.521
2	0	1	1	1	0.202(9.884)	0.190(9.838)	14.151
3	0	2	2	2	0.174(9.999)	0.201(9.868)	14.517
4	1	0	1	2	0.159(9.957)	0.155(9.886)	16.081
5	1	1	2	0	0.133(9.890)	0.127(9.865)	17.718
6	1	2	0	1	0.160(9.770)	0.165(9.776)	15.781
7	2	0	2	1	0.141(9.982)	0.139(1.002)	17.077
8	2	1	0	2	0.199(1.005)	0.168(1.013)	14.696
9	2	2	1	0	0.142(1.001)	0.140(1.001)	17.046

Table 9 ANOVA (2) table of in the directional stoning orthogonal to the pulling direction

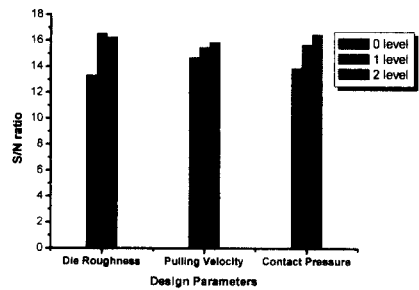
Parameters (Column number in OA)	Average S/N value in level			Sum of Square	Number of Freedom	Mean Square	S'	F ratio (%)
	0	1	2					
Die roughness (1)	40.189	49.582	48.820	18.143	2	9.071	17.271	20.80† (58.7)
Pulling velocity (2)	44.679	46.566	47.345	1.253	2	0.626		
Contact pressure (3)	41.999	47.278	49.313	9.500	2	4.750	8.628	10.89‡ (29.4)
Error (4)	46.286	47.009	45.295	0.494	2	0.247		
Ep (pulling velocity)				1.747	4	0.436	3.491	(11.9)
Total				29.390	10		29.390	(100)

변수조건에 따라 마찰실험을 수행하였다.

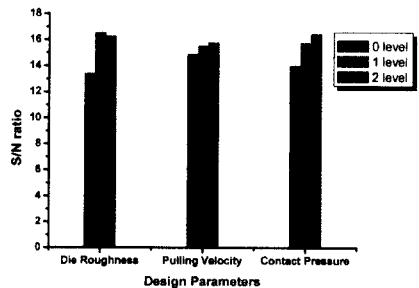
또한 특성치의 명확성을 위하여 잡음인자를 고려한 반복실험을 수행하여 동일한 변수조합이 갖는 마찰계수를 다구지 방법의 S/N 비로 변환하였다. 이전과 마찬가지로 마찰계수와 S/N 비와의 관계는 Fig. 8 과 동일하며 S/N 비가 클수록 마찰계수는 낮다.

금형특성, 접촉면압, 인출속도가 SPCEN 소재의 평판마찰특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 분산분석하여 그 결과를 Table 9 에 나타내었고 Fig. 9(b)에 각 변수의 각 수준별 평균 S/N 비를 점 추정방법으로 나타내었다. S/N 비가 클수록 마찰계수는 낮으므로 각 변수의 수준에서 S/N 비가 가장 큰 조건은 금형 거칠기가 1 수준, 인출속도가 2 수준, 접촉압력이 2 수준일 경우이다. 이 결과는 이전의 금형가공방향에 소재 인출방향과 동일한 경우에서 얻은 결과와 동일하다.

Table 9 에서 알 수 있듯이, 금형 거칠기가 마찰계수에 미치는 영향이 아주 크며(기여도 58.7%) 그 다음으로 접촉압력(기여도 29.4%) 이다. 마찬가지로 인출속도가 마찰계수에 미치는 영향은 미소하므로 오차항에 풀링(Pooling) 시켜 각 변수의 기여도를 계산하였다.



(a) OA1



(b) OA2

Fig. 9 S/N ration of each design parameter's levels

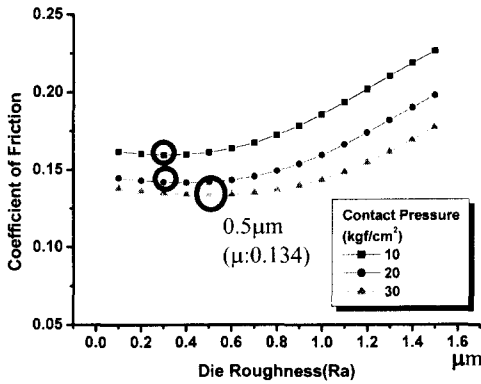


Fig. 10 Friction coefficient in the directional stoning parallel to the pulling direction using NN1

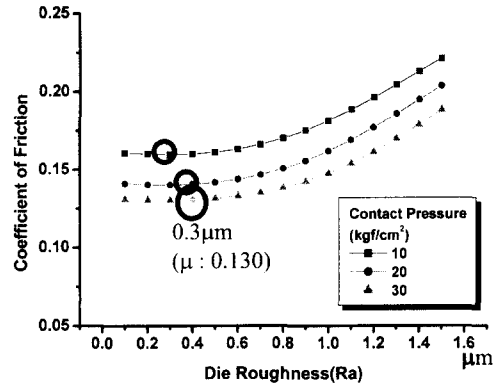


Fig. 11 Friction coefficient in the directional stoning orthogonal to the pulling direction using NN2

직교배열표(OA1, OA2)에 따라 평판마찰실험을 수행하고, 마찰특성에 대한 각 변수의 영향도를 분석하였다. 분석결과 마찰특성에 미치는 영향은 금형 거칠기, 접촉압력 그리고 인출속도 순으로 나타났다. Table 7 과 Table 9 을 비교하면, 금형 가공방향이 소재인출방향에 수평인 경우에 금형 거칠기의 영향은 56.2%이며 수직인 경우는 58.7%이다. 따라서 금형 가공방향이 소재인출방향에 수직인 경우가 수평인 경우보다 마찰특성에 보다 민감하게 영향을 미친다는 것을 짐작할 수 있다. 마찰특성에 대한 접촉압력의 기여도는 유사하였다.

5.2 마찰계수의 예측

금형가공방향이 소재 인출방향에 수평인 경우에 대하여 평판 마찰실험을 수행한 Table 6 과 Table 8 의 각 직교배열표(OA1, OA2)를 신경망 학습의 입력데이터로 이용하여 미해석 변수조합이 갖는 마찰계수를 예측하였다. Table 6의 설계변수 조건에 대한 9번의 실험조건을 신경망의 입력층으로 하였고 목적함수로는 변환된 마찰계수값 즉, S/N비를 출력층 값으로 입력하였다.

사용된 신경망의 구조는 입력층 뉴런은 3 개이며 여기에 설계변수를 할당하였고, 은닉층은 2 층 구조로 각각 20, 10 개의 뉴런을 가진다. 출력층은 1 개의 뉴런에 S/N 비를 할당 하였다. 학습의 수렴 기준은 목적값과 실제 출력값의 차이가 10⁻⁷에 도달 할 때 까지이며, 그 때까지의 학습반복횟수는 20550 회이었다. 본 연구에서는 금형가공방향이 소재 인출방향에 수평인 경우(NN1:Neural Network1)와 수직인 경우(NN2:Neural Network2)에 대하여 신경망 학습을 하였다.

5.2.1 소재인출방향과 수평인 경우

Fig. 10 에 금형 가공방향이 소재의 인출방향에 수평인 경우, 인출속도가 30mm/sec 일 때 금형의 표면 거칠기와 접촉면압 (10, 20, 30 kgf/cm²) 이 마찰계수에 미치는 영향을 신경망으로 예측하여 나타내었다. 이전의 분산분석 결과에서 인출속도는 그 영향이 다른 인자에 비해 매우 작았으며, 2 수준 즉, 30mm/sec 경우에 마찰계수가 낮은 조건이므로 여기서는 동일속도에서 금형속도와 접촉면압의 관계를 고려하였다.

Fig. 10 에서 알 수 있듯이, 압력에 따라 가장 낮은 마찰계수를 갖는 금형 가공상태를 살펴보면 접촉압력이 10kgf/cm² 일 때 금형 거칠기는 0.3μm (μ=0.160), 접촉압력이 20kgf/cm² 인 경우에는 0.4μm (μ=0.142) 그리고 30kgf/cm² 일 때는 0.5μm (μ=0.134)이었다. 따라서 압력이 증가할수록 마찰계수는 낮아지며, 낮은 마찰계수를 갖는 금형 거칠기는 증가하는 경향을 알 수 있었다.

5.2.2 소재인출방향과 수직인 경우

Fig. 11 에 신경망으로 예측한 금형특성 (표면 거칠기), 접촉면압 (10,20,30kgf/cm²) 그리고 인출속도 30mm/sec 에 대한 마찰계수를 나타내었다. Fig. 11 은 앞에서 살펴보았던 Fig. 10 과 거의 유사한 경향을 나타내었다. 마찬가지로 가장 낮은 마찰계수를 갖는 속도범위는 30mm/sec 이고, 이 때 금형 거칠기 와 접촉면압이 마찰계수에 미치는 영향을 살펴보면, 낮은 마찰계수를 갖는 금형 가공상태는 접촉압력이 10kgf/cm² 일 때 금형 거칠기는 0.2μm

Table 10 Verification of NN results in friction test

Ra (μm)	FCD55	V (mm/sec)	P (kgf/cm ²)	Noise		ANN result
				0	1	
				coefficient of friction		μ
P:0.08 V:0.13	Horizontal	30	25	0.146	0.145	0.141
P:0.08 V:0.13	Horizontal	30	30	0.136	0.135	0.137
P:0.07 V:0.10	Vertical-1	30	25	0.134	0.139	0.135
P:0.07 V:0.10	Vertical-1	30	30	0.128	0.132	0.131
P:0.38 V:0.32	Vertical-2	30	30	0.124	0.126	0.130

($\mu=0.160$), 접촉압력이 20kgf/cm^2 인 경우에는 $0.3\mu\text{m}(\mu=0.140)$ 그리고 30kgf/cm^2 일 때는 $0.3\mu\text{m}(\mu=0.130)$ 이었다. 금형 가공방향이 소재 인출방향과 수평인 경우와 마찬가지로 접촉압력이 증가할수록 금형 거칠기가 상승함에 따라 마찰계수는 완만하게 감소하였다.

5.2.3 예측결과의 검증

신경망으로 예측한 미해석 변수조합의 마찰계수에 대한 검증실험을 위하여 Table 10의 변수조건으로 마찰실험을 수행하였다. 여기서, 신경망으로 예측된 동일조건에서 가공방향이 소재인출방향에 수직인 경우가 가공방향이 수평인 경우보다 마찰계수가 낮음을 확인 할 수 있었고, 면압이 증가할수록 마찰계수는 낮아지는 특성을 확인 할 수 있었다. 검증실험에서도 모든 실험의 스코어링계수는 No Scoring 조건을 만족하였다.

신경망으로 예측한 가장 낮은 마찰계수를 갖는 조건인, 속도 30mm/sec , 접촉압력 30kgf/cm^2 이고 소재 인출방향에 수직으로 가공하여 거칠기가 약 $0.3\mu\text{m}$ 을 갖는 조건으로 실험한 결과, 실제 신경망으로 예측한 값보다 더 낮은 마찰계수를 가졌다. Table 10에서 수평, 수직으로 금형을 가공하고 압력을 달리하여 실험을 수행한 결과 신경망의 예측치와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

5.3 마찰계수에 미치는 변수영향 고찰

금형의 표면정도는 본 연구에서 고려한 설계변수범위 내에서 마찰계수에 미치는 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 금형의 표면정도는 다듬질방향에 관계없이 약 $0.5\mu\text{m}(\text{Ra})$ 인 경우와 $0.1\mu\text{m}(\text{Ra})$ 인 경우가 거의 유사한 마찰계수를 갖는 것을 실험적으로 확인하였다. 그리고 신경망의 학습

으로 금형 거칠기가 약 $0.3\mu\text{m}(\text{Ra})$ 범위에서 가장 낮은 마찰계수를 갖는 조건임을 예측하였고, 실험으로 확인 하였다. 이러한 현상은 기존의 연구결과와 비교해 보면 Martz⁽⁴⁾ 등은 거친 표면은 돌기 사이에 오일을 공급하고 먼지나 마멸 입자들의 돌출구 작용을 하기 때문에 거친 표면일수록 마찰특성에 좋은 영향을 미친다고 하였으며 Bossler⁽⁶⁾ 등도 적당한 표면 거칠기를 형성하는 것이 윤활유 Pocket 효과를 증대 시키므로 매끈한 표면보다는 윤활 상태가 좋다고 설명하였다. 실험결과, 본 연구에서는 금형과 소재의 마찰을 최소로 하는 금형의 표면 거칠기의 범위가 존재하며 표면 거칠기가 낮으면 낮을수록 마찰 역시 낮아지지 않음을 확인할 수 있었다.

본 연구의 결과 금형과 소재의 접촉압력이 증가할수록 마찰계수는 다소 감소하였다. 이러한 현상은 마찰압력이 증가할수록 마찰저항력이 떨어지는 것으로 최근의 Lanzone⁽¹⁵⁾ 연구에서도 유사한 결과를 볼 수 있다. 일반적으로 인출속도가 증가하면 소재와 금형사이에 열을 발생시키고, 그 발생된 열로 인해 윤활 능력이 떨어지게 된다. 그러나 본 연구에서는 연속적인 작업이 아니며, 윤활능력을 저하 시킬만한 열이 발생되지 않았다고 본다. 이것은 표면상태를 판단하는 스코어링계수(SF)값이 모두 표면무변화 조건을 만족하는 결과에서 그 원인을 찾을 수 있다. Kotchman⁽¹⁶⁾ 등의 금형 코플러 마찰실험결과에서도 인출속도가 마찰계수에 미치는 영향은 미소하였으며, 본 연구와 유사한 결과를 얻었다.

6. 결론

본 연구에서는 금형의 관점에서 마찰 및 판별성 형성에 미치는 금형의 표면정도의 특성을 파악하여 성형에 적합한 금형의 표면 가공상태를 제시하였다. 이론해석을 위하여 마찰실험시 소재의 인출속도와 금형과 소재간의 접촉면압, 그리고 소재의 인출속도를 변화시켜 평판 마찰실험을 수행하였으며, 금형의 표면 가공상태, 접촉면압 그리고 인출속도가 마찰계수에 미치는 영향을 평가하였다. 본 연구에서는 최소의 실험으로 각 변수가 마찰계수에 미치는 영향을 평가하고자 기존의 다구찌 방법과 신경망이 가지는 단점을 보완하고 장점만을 살린 새로운 개념의 다구찌 방법을 이용한 신경망 설계기법을 도입하였다.

본 연구과제인 금형의 표면정도가 마찰 및 판별 형성에 미치는 영향에 관한 결론을 요약하면 아래

와 같다.

(1) 판재의 마찰특성에 영향을 미치는 인자로 금형 거칠기, 접촉면압 그리고 인출속도의 영향을 알아본 결과 금형 거칠기가 가장 큰 영향을 미치며 접촉면압의 영향도 큰 것으로 나타났다. 그러나 인출속도는 마찰거동에 미치는 영향이 매우 작았다.

(2) 금형 가공방향이 소재 인출방향에 수직인 경우가 수평인 경우보다 마찰계수가 낮았다.

(3) 접촉면압이 상승함에 따라 마찰계수를 최소로 하는 금형의 거칠기는 상승하는 경향을 가지며 금형 가공방향이 소재 인출방향에 수평인 경우는 30kgf/cm^2 에서 금형 거칠기가 약 $0.5\mu\text{m(Ra)}$ 일 때 마찰계수($\mu=0.134$)가 낮았으며, 금형 가공방향이 소재 인출방향에 수직인 경우는 30kgf/cm^2 에서 금형 거칠기가 약 $0.3\mu\text{m(Ra)}$ 일 때 마찰계수($\mu=0.125$)가 낮았다.

(4) 금형 거칠기가 낮을수록 마찰계수가 낮아지는 것은 아니며, 특히 금형 가공방향이 소재 인출방향에 수평인 경우, 금형 거칠기가 약 $0.3\mu\text{m(Ra)}$ 이하 영역에서 마찰이 다소 상승하는 경향을 나타내었고 금형 가공방향이 소재 인출방향에 수직인 경우에는 약 $0.3\mu\text{m(Ra)}$ 이하에서 균일한 마찰계수를 갖는 것을 알 수 있었다.

(5) 금형의 거칠기를 소재 인출방향에 수직으로 $0.3\mu\text{m(Ra)}$ 로 연마한 경우가 가장 낮은 마찰계수($\mu=0.130$)를 갖는 조건임을 예측하였다. 연마지 600 으로 약 20~30 분 연마하여 금형 거칠기를 $0.3 \sim 0.32\mu\text{m(Ra)}$ 로 연마하여 마찰실험한 결과 측정된 마찰계수, μ 는 0.125 이었다. 신경망의 예측결과와는 약간의 차이가 있었으나, 가장 낮은 마찰계수를 갖는 조건임을 알 수 있었다.

(6) 신경망을 이용하여 미해석 변수조합(접촉면압, 인출속도, 금형 거칠기)가 마찰특성에 미치는 영향을 예측하였고, 검증실험 결과 잘 일치하였다. 따라서 다구찌 방법을 이용한 신경망의 적용은 효율적인 해석기법임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학기술단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) Bowden F.A. and Tabor D., 1954, *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford Press.
- (2) Schey J.A., *Tribology in Metal Working: Friction, lubrication and wear*, 1983, American Society for Metal Park, OH.
- (3) Staph H.E., Ku P.M. and Carper H.J. 1973, "Effect of Surface Roughness and Surface Texture on Scuffing," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 8, pp. 197~208.
- (4) Martz L.S., 1949, "Preliminary Report of Developments in Interrupted Surface Finishes," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, Vol. 161, pp. 1~9.
- (5) S.C.Kang and K.C.Ludema, 1990, "The Beaking-in of Lubricated Surface," *Wear*, Vol. 100, pp. 315~331
- (6) Bossler R.B. Jr., 1965, "Improved Boundary Layer Lubrication Behavior," *Lubr. Engrg.*, Vol. 21, No. 3, pp. 104~111, March.
- (7) Kim D.H., Kim D.J., and Kim B.M., 1999, "The Application of Neural Networks and Statistical Methods to Process Design in Metal Forming Processes", *Int. J Adv. Manuf. Technol*, Vol. 15, pp. 886~894.
- (8) Wojtowicz W.J., 1970, "Lubricating Characteristics of Drawing Compound," *SME creative Mfg Semi*.
- (9) Box G.P., Hunter W.G., and Hunter J.S., 1978, *Statistics for Experiments*, Wiley, New York.
- (10) Ross P.J., 1988, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill.
- (11) Montgomery D.C., 1984, *Design and Analysis of Experiments*, Willy, New York, 2nd edn.
- (12) Rumelhart D.E., Hinton G.E. and Williams R.J., 1986, *Learning Internal Representations by Error Propagation*, Parallel Distribution Processing Cambridge MA: MIT press, pp. 318 ~362.
- (13) 김 동환, 고 대철, 김 병민, 최 재찬, 1998, "가공성을 고려한 다단계 금속성형공정의 예비성형체 설계방법: 다구찌 방법을 이용한 신경망의 적용," 대한기계학회논문집 A 권, 제 22 권 제 9 호, pp. 1615~1624.
- (14) Kim D.H., Ko D.C. and Kim B.M., 1999, "Application of Artificial Neural Network and Taguchi Method to Preform Design in Metal Forming Considering Workability," *Int. J Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 771~185.
- (15) Lanson J.M., Cardew-Hall M.J. and Hodgson P.D., 1998, "Characterizing Frictional Behaviour in Sheet Metal Forming," *J of Materials Processing Technology*, pp. 251~256.
- (16) Kotchman D.P., Kim I., Sa C-Y. and D.Lee, 1992, "Determination of Friction Behavior Sheet Metals Using Orthogonal Arrays," *J of Materials Engineering and Performance*, pp. 555~564.