

각종 도금강판의 신장성형시 마찰계수측정

권재욱 · 김인수* · 이동녕

Measurement of Friction Coefficient in Stretching of Coated Steel Sheets

Jae-Wook Kwon, Insoo Kim* and Dong-Nyung Lee

Dept. of Metallurgical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742

**Dept. of Materials Science and Engineering, Kum-Oh National Institute of Technology,
Kumi, Kyung Buk 730-701*

ABSTRACT

Coated sheet steels have been increasingly used in automotive industry for improving corrosion resistance. One of the arised concerns is frictional behavior of coated sheet steel in stamping process. But analyses of the frictional behavior are complex and difficult. A tensile strip test has been developed for evaluating friction under the condition which simulate the stretching of sheet. Tests are conducted under different die radius and lubrication conditions. Electro-galvanized steel sheets show a lower coefficient of friction than bare steel sheets whose coated layers have been chemically removed. The coefficients of friction are independent of die radius.

Key Words : stamping, friction coefficient, galvanized steel, lubrication, die radius

1. 서 론

최근에 자동차 산업이 발달함에 따라 철강업계와 자동차 회사에서는 종전에 많이 사용하던 냉연 무도금강판 대신 부식에 저항력이 강한 용융 아연도강판, 전기 아연도강판, Zn-Ni 도금 그리고 Zn-Fe 도금강판등 다양한 표면처리된 재료들을 개발하여 사용하게 되었다. 이렇게 재료 수명연장을 위해 냉연강판 대신 도금강판을 사용한 이후로 냉연강판의 가공시에 야기되지 않았던 많은 문제점들이 나타났다. 이들 문제점들을 간단히 요약해 보면 약한 도금층의 존재로

인한 도금강판의 기계적성질 저하, 가공공정중에 마찰에 의한 도금층의 박리 및 손상, 도금강판의 표면 특성 변화로 인한 마찰과 최적의 윤활조건의 변화, 또한 도금강판 사용시 도장성, 용접성의 저하 등으로 나타날 수 있는데 이런 문제점들로 인해 디프드로잉과 같은 가공 공정중에 블랭크의 압하력과 같은 공정변수를 조절하기가 까다로와 졌다.

이와같은 문제점들을 해결하기 위한 방안으로 여러 노력들이 행해졌는데 박판금속의 마찰과 윤활에 따른 표면도금층의 역할 연구도 활발해 졌다. Zeng과 Overby^[1]에 의하면 무도금강

서울대학교 공과대학 금속공학과

* 금오공과대학 재료공학과

판과 도금강판의 마찰계수를 측정해 비교한 결과 도금강판이 큰 마찰계수를 보였고 Fox와 Lee^[2]는 도금층이 일종의 윤활역할을 하여 도금강판에서 작은 마찰계수를 얻은바 있다. 이와 같은 상반된 결과들을 Keeler^[3]는 도금층만의 작용이 아니라 도금층과 윤활, 다이재료, 드로잉속도등의 여러가지 변수들의 상호작용의 결과에 기인한다고 보았다. 또한 도금강판의 경우 냉연강판과 비교해 동일한 코일내에서도 부위별로 도금량의 차이로 인해 마찰과 윤활거동에 큰 편차를 보인다고 보고된 바 있다.

보통 판재의 마찰계수를 측정하기 위한 측정장치는 국외에서 여러 연구자들에 의해 개발되었으나 이 때의 마찰계수는 측정장치에 따라 약간의 차이를 보인다. 이 연구에서는 위의 경우를 참조하여 좀더 실질적인 성형공정에 맞는 마찰계수 측정장치를 제작하고 각종 자동차 차체용 도금 강판의 윤활, 다이 반경에 따른 마찰계수를 측정하는데 목적을 두고 있다.

2. 이론적 배경

2. 1. 도금강판의 마찰 계수에 영향을 주는 변수

아연도강판이나 도금강판들은 많은 변수들에 의해 영향을 받는다. 강판의 기지, 강판과 도금층의 경계, 도금층과 다이간의 경계, 도금층 등은 재료를 성형가공할때 복합적인 상호작용을 하여 가공응력이나 변형에 큰 영향을 줄것이다. 이러한 변수들의 상호작용으로 도금강판은 폴링(galling; 도금층이 다이에 미끄러질때 도금층이 다이에 고착하여 계속 미끄러질 경우 도금층을 파헤치는 현상), 균열, 박리등으로 강판의 질과 성형공정의 효율을 저하시킨다. 이런 다양한 도금층의 손상은 대개 도금층의 변형과 파괴와 밀접한 관계가 있다. 예를들어 아연도금층의 결정학적 집합조직이 큰 분해전단응력을 가진 기저면이라면 연성이 뛰어나고 소성변형이 된다고 보고된 바도 있다^[4].

도금강판의 마찰 계수에 영향을 주는 변수로 생각해 볼 수있는 대표적인 것은 다이재료이다.

그러나 다이재료/표면 간의 작용이 마찰계수에 영향을 주는지는 명확하지 않다. Brazier와 Thomson^[5]은 다이 재료에 따라 마찰이 큰 영향을 준다고 한 반면 Meuleman과 Dwyer^[6, 7]는 다양한 다이 재료와 표면처리에 따라 마찰계수의 차이를 발견하지 못했다. 그리고 도금강판과 무도금강판과의 마찰계수 비교에서도 서로 상반된 결과들이 나타나고 있다. 또한 다이나 재료의 표면거칠기에 관한 연구, 실제 스탬핑공정과 유사한 상황에서 속도와 윤활제에 따른 연구도 행해졌다^[8, 9].

2. 2. 마찰계수 측정장치

박판성형과정에서 펀치와 판재면사이에서의 마찰은 재료표면의 변형분포, 성형 하중 등에 큰 영향을 준다. 이런 마찰에 대한 이해는 기술적으로는 금형설계에 다이설계의 적부를 판단할 수 있는 기초자료로 이용할 수 있을 뿐 아니라 경제적으로는 스탬핑시에 재료의 손실도 줄일 수 있다.

디프드로잉에서 마찰거동은 Fig.1에서와 같은 (1) 플랜지 영역 (2) 다이반경 영역 (3) 펀치반경 영역으로 나누어 생각할 수 있는데 일반적으로 마찰이 플랜지부위에서는 작고 펀치반경에서는 커야 파괴없이 재료를 성공적으로 가공할 수 있다고 알려져 있다^[10]. 플랜지영역에서는 미끄럼 마찰이 우세할 것이나 펀치와 다이사이의 부위에서는 미끄럼은 국부적인 소성변

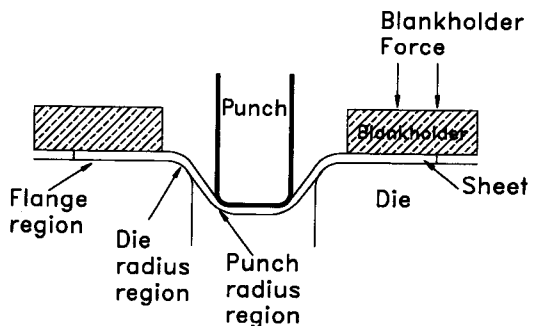


Fig. 1. Schematic diagrams showing three different regions in deep drawing where the role of friction is important.

형에 의한 신장에 비해 무시할 수 있다^[11]. 이런 두가지 경우의 마찰계수가 서로 다르므로 두 경우를 각기 실제 성형공정과 유사한 실험을 통해 야만 정확한 마찰계수를 측정할 수 있다.

도금판재의 마찰계수를 측정하기 위한 측정 장치는 여러 연구자들에 의해 개발되었으나 이때의 마찰계수는 측정장치에 따라 차이를 보인다. 일반적으로 마찰계수를 구하는 보편적인 장치는 Nine^[12]에 의해 고안된 드로오 비드 실험 장치이다. 이 장치는 드로잉시에 비드 부분에서의 재료의 마찰연구를 위한 실험장치로 이를 이용하여 많은 연구^[13]들이 행해졌다.

미끄러짐 마찰 실험은 누름힘과 당기는힘으로 단순히 행할 수 있지만 신장마찰실험의 경우는 좀 색다른 방법이 필요하다. 아래에 디프드로잉시에 여러영역에서의 마찰계수 측정에 관해 알아본다.

i) 플랜지 영역

플랜지 영역에서의 마찰은 미끄럼 마찰이 지배적이다. 이 전형적인 미끄럼 마찰계수 측정은 Fig. 2a와 같은 방법으로 행할 수 있다. 이 경우의 마찰계수는 누르는 힘과 당기는 힘의 비 ($\mu_1 = F_1 / (2F_d)$)로 간단히 나타낼 수 있다.

ii) 다이반경 영역^[14]

다이 반경영역에서의 마찰 실험장치 개략도를 Fig. 2b,c에 나타내었다. 이때 반경영역에서 판재를 당기는데 필요한 힘은 굽힘힘 F_b 와 미끄러짐힘 F_s 의 합으로 나타낸다는 가정에서 마찰계수식을 유도한다.

반경 R 인 다이 반경 주위의 힘(F)의 변화는 Fig. 2b과 같다. 그리고 $d\theta$ 로 구성된 요소에서의 반경 방향 힘의 평형은

$$q = F / (R \cdot w) \quad \dots\dots (1)$$

여기서 q : 접촉 응력 R : 다이 반경 w : 시편 폭 접선방향의 힘은

$$dF = \mu_2 \cdot q \cdot R \cdot w \cdot d\theta$$

$$\text{즉 } dF / F = \mu_2 \cdot d\theta \quad \dots\dots (2)$$

식(2)를 적분하면

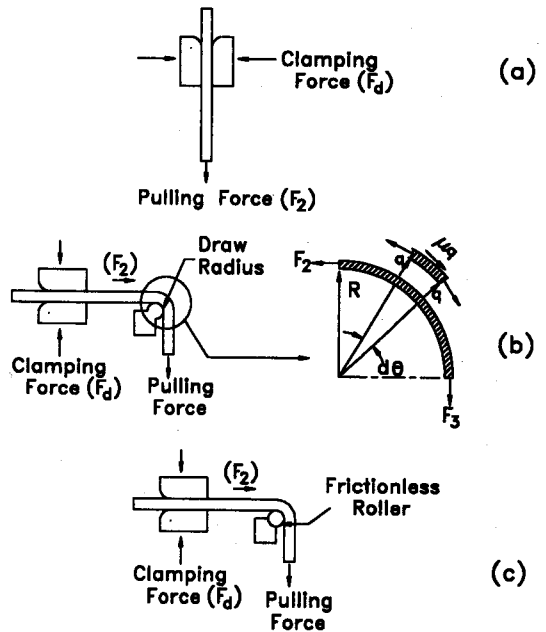


Fig. 2. (a) Schematic diagram of flange friction test.
 (b) Schematic diagram of draw radius with solid block and forces on strip at a corner of radius R .
 (c) Schematic diagram of draw radius with frictionless roller.

$$F_s / F_2 = \exp(\mu_2 \cdot \pi / 2) \quad \dots\dots (3a)$$

$$\text{혹은 } \mu_2 = 2 / \pi \ln(F_s / F_2) \quad \dots\dots (3b)$$

여기서 $F_s = F_3 - F_b$ 로 간단히 나타낼 수 있다.

다이반경 영역의 마찰계수 μ_2 를 결정하기 위해서는 3번의 실험이 필요하다. 첫번째 실험은 위에서 설명한 바와 같은 플랜지 영역에서 당기는 힘(F_2)을 결정하기 위한 미끄럼 마찰실험이다. 두번째는 플랜지 영역과 다이반경 영역에서 당기는 힘(F_3)을 측정하기 위한 Fig. 2b과 같은 실험이다. 마지막 세번째 실험은 Fig. 2c와 같이 다이반경 영역을 마찰없는 롤로 대체해 굽힘힘(F_b)을 측정하기 위해 행한다. 이때의 당기는 힘(F_3^*)은 플랜지영역의 당기는힘(F_2)과 굽힘힘(F_b)의 합이다. 이 세가지 실험으로 부터 다음과 같은 식을 유도해 낼 수 있다.

$$F_s = F_3 - F_3^* - F_2 \quad \dots\dots (4)$$

식(4)를 식(3b)에 대입함으로써 다이반경 영역의 마찰계수 μ_2 를 얻을 수 있다.

iii) 편치반경영역

Duncan^[15] 등에 의해 만들어진 신장 마찰계수 측정장치 개략도는 Fig. 3에 나타내었다. 이 경우의 마찰계수는 다음과 같은 식에 의해 얻을 수 있다.

$$\mu_3 = \pi / 2 \ln(P_1 / P_2) \quad \dots\dots (5)$$

여기서

- P_1 : 인장시험기에 기록되는 하중
- P_2 : $P_1 - e_1$ (하중 대 수직변형률) 관계와 $e_1 - e_2$ (수직변형률 대 수평변형률) 관계에서 얻어지는 하중
- e_1 : 수직변형률
- e_2 : 수평변형률

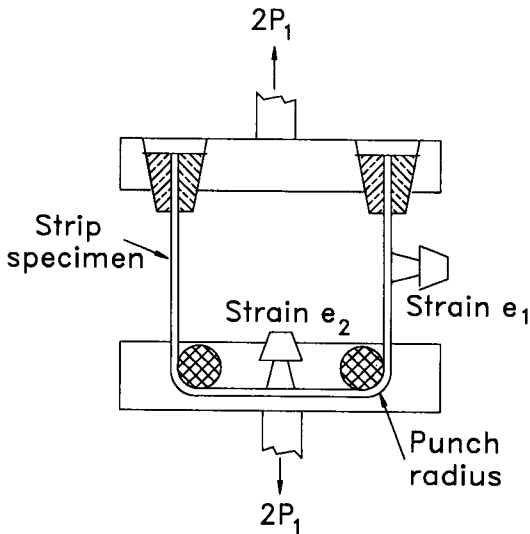


Fig. 3. Schematic diagram of punch radius friction test^[21].

3. 실험방법

3. 1. 실험 재료

본 연구에서 사용된 도금강판은 모두 3종류, 전기 아연도강판, Zn-Ni, Zn-Fe 합금 도금강판이며, 포항종합제철(주)에서 공급된 것을 그대로

로 사용한 것이다. 앞으로 기술의 편의상 각 강판의 분류를 A, B, C로 구분하여 각 강판의 화학 조성과 기타 사항을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of coated steels.

steel	Thickness	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Ti
A	0.7	0.0206	0.0037	0.1142	0.0062	0.0069	0.0052	0.0585	-
B	0.81	0.0038	0.0054	0.0969	0.0056	0.0090	0.0138	0.0431	0.0459
C	0.71	0.0024	0.0039	0.1113	0.0076	0.0104	0.0051	0.0542	0.0385

A : Pure Zinc electro gvanized steel sheets (coating weight : 10.767 g / m²)

B : Zn-Ni alloy electro gvanized steel sheets (coating weight : 32.4 g / m²)

C : Zn-Fe alloy electro gvanized steel sheets (coating weight : 38.458 g / m²)

3. 2. 인장 시험

압연 방향에 대해 각각 0°, 45°, 90° 방향을 따라 시편 규격 ASTM E-8 의 소형(sub-size) 인장 시편을 만들었다. 표점 거리 25 mm, 크로스헤드 속도 5 mm/min로 인장하여 하중-연신율 곡선을 얻었으며, 이로부터 항복 강도, 인장 강도, 균일 연신율을 얻었으며 파괴된 시편으로부터 총 연신율을 얻었다. 가공 경화 지수(n 값)은 항복점 이후부터 최대 하중점까지의 변형을 범위에서 $\ln(\text{진응력}) - \ln(\text{진변형률})$ 의 기울기로부터 구하였다. 변형 속도 민감도(m 값)을 구하기 위해 압연 방향에 대해 0°, 45°, 90° 방향의 인장 시편을 이용해서 연신율 15%에서 크로스헤드 속도를 5 mm/min 에서 100 mm/min로 순간적으로 변화시켜 $m = \ln(\sigma_2 / \sigma_1) / \ln(\epsilon_2 / \epsilon_1)$ 의 관계식을 이용했다. 또 0°, 45°, 90° 방향의 인장 시편에 한 칸의 길이 3 mm인 정사각형의 격자망으로 된 사진 감광 무늬를 입힌 후 15% 연신하여 소성 변형비(R 값)를 측정하였다. 변형후의 길이를 1/1000 mm 까지 측정하여 $R = \ln(W_0 / W_f) / \ln(W_{f1} / W_{f0})$ 의 식으로 계산하였다.

3. 3. 도금층 X선분석과 표면형상분석

도금층의 상들을 알아보기 위해 X선 회절 실험

험을 하였다. 디프레토미터의 실험조건은 다음과 같다.

타겟 : Cu-K α 전압 : 30 kV 전류 : 10 mA

또한 도금층의 표면을 관찰하기 위해 SEM (scanning electron microscopy)으로 표면의 형상(morphology)을 관찰하였고 도금층을 확인 하였다.

3. 4. 마찰계수 측정

다른 마찰계수 측정장치들을 참조하여^[16] 인장시험기에 부착하여 사용할 수 있는 신장 마찰계수 측정장치를 만들었다. 이 장치는 원통형다이에서 신장되는 시편에 마찰계수를 측정할 수 있게 고안된 것으로 특징은 한 실험장치로도 다이반경의 크기를 조절 할 수 있을 뿐 아니라 같은 실험조건 하에 네가지 접촉각도로 마찰 신장 실험 할 수 있어서 실험오차를 줄일 수 있다는 특징이 있다. 이 마찰계수 측정장치는 자동차용 강판 뿐아니라 폴리에틸렌과 같은 재료의 신장 마찰계수를 측정할 때에도 유용히 쓰일 수 있다.

그러면 본 실험의 마찰계수측정 장치의 구조와 기능에 대해서 알아보자.

Fig. 4a,b는 마찰계수 측정장치를 나타낸 것으로 이는 윗판(top plate), 아래판(base plate), 다이휠지지대(wheel mounting insert), 다이휠덮개(cap), 다이휠 다섯가지 구성요소로 이루어진다. Fig. 4a에 나타낸바와 같이 고정된 하부그립(lower grip)에 대해 상부 그립(upper grip)의 위치를 45°, 90°, 135°, 180°로 이동하며 고정시키기 위해 아래판에 여러구멍들을 뚫었다. 다이휠의 크기는 Fig. 5와 같이 8, 4, 2, 1, 0.5 cm인 다섯종류가 있다. 이렇게 다이휠 크기가 다르더라도 인장시험기의 인장축과 시편의 인장축이 일치하도록 하기 위해 다이휠 지지대와 다이휠을 교환할 수 있게 했다. 다이휠의 재료는 다이공구강인 SKD11로 가공, 열처리했고 다이휠 이외의 다른부분은 중탄소강인 S 45C로 했다. Fig. 4b에 나타낸 다이휠 양끝 쪽의 구멍

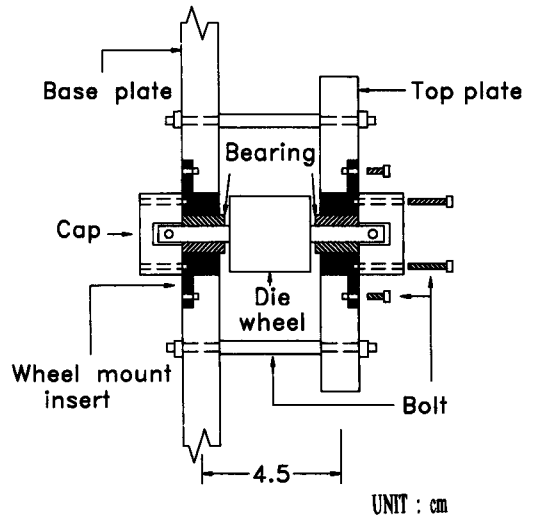
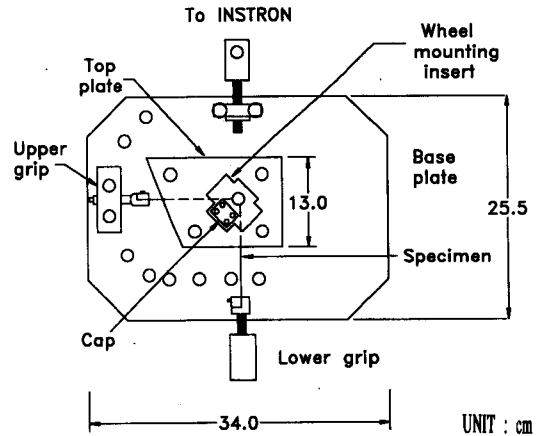


Fig. 4. (a) Testing apparatus to measure the friction coefficient:Front view.
(b) Testing apparatus to measure the friction coefficient:Side view.

은 다이휠 덮개와 연결되어 다이휠과 시편사이의 마찰이 있을 경우와 무마찰 실험을 위해 구멍에 다이휠의 회전을 제어할 수 있는 핀을 주입 할 수 있다. 윗판과 아래판을 지지하는 볼트와 너트를 이용했다.

이와같은 측정장치에서 마찰계수를 구하려면 전방 인장하중과 후방 인장하중을 알아야 하는데 전방인장하중은 인장시험기의 로드셀로 부

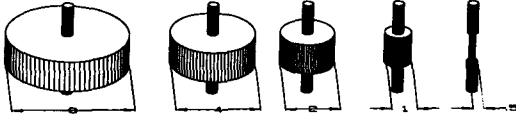


Fig. 5. Testing die wheels.

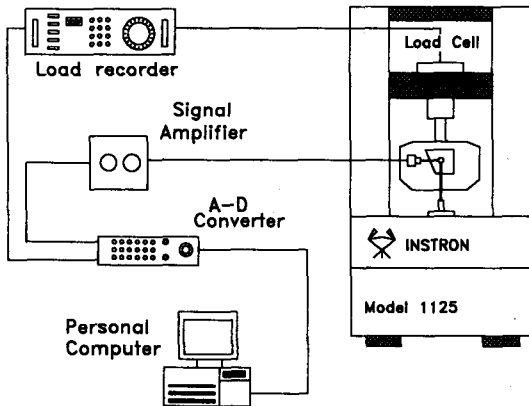


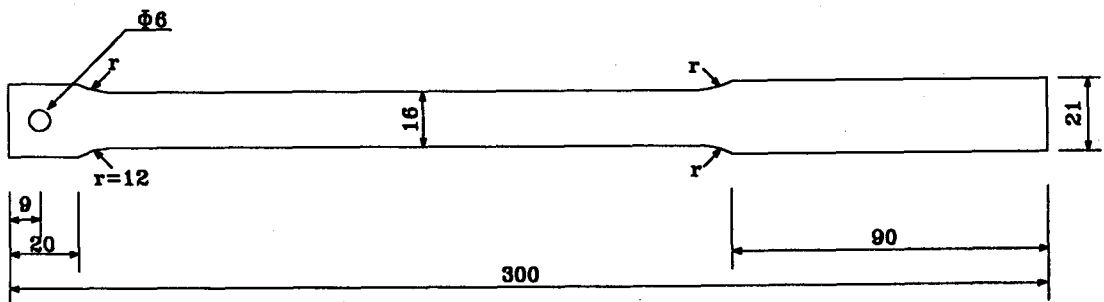
Fig. 6. Friction test system.

터 얻을 수 있고 상부그립부분에 스트레인 게이지를 부착하여 후방인장하중을 측정할 수 있다. 스트레인 게이지는 KYOWA에서 시판되는 120 Ω, 게이지 길이 2 mm짜리를 사용했다. 이를 상부그립에 길이 방향과 이에 직교하는 방향으로 부착하였다. 이런 스트레인 게이지에서 나오는 미소한 전압은 브리지 박스를 통해 DPM 307A 스트레인 증폭기를 사용하여 증폭시켰다. 증폭된 신호는 A-D 변환기를 거쳐 LAB WINDOW 소프트웨어를 이용하여 개인용 컴퓨터에 입력되어 처리되는 Fig. 6과 같은 DATA ACQUISITION SYSTEM을 완성하여 실험과정을 컴퓨터 모니터로 하중의 변화를 감시하며 로드셀의 하중과 스트레인 게이지에서의 두 하중을 처리했다. 또한, 실험전에 로드셀의 하중과 스트레인게이지의 하중을 영점보정하였다. 마찰계수 측정을 위한 시편의 형상을 Fig. 7에 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 기계적성질

각종 도금강판의 인장 시험 결과로 얻은 기계적 성질들은 Table 2에 정리하였다. 일반적으로 저탄소 강판은 Hollomon의 가공경화식($\sigma = K\epsilon^n$)을 잘 만족시키는 것으로 알려져 있으며



UNIT: mm

Fig. 7. Dimension of friction test specimen.

Table 2. Mechanical properties of coated steel sheets.

Steel-Angle to RD	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	ϵ_u (%)	ϵ_t (%)	n	m	R
A-0	222.1	322.2	24.4	48.5	0.222	0.0134	1.40
A-45	226.2	331.4	23.1	42.8	0.215	0.0157	1.08
A-90	224.9	320.9	24.6	49.1	0.212	0.0151	1.76
X	224.9	326.5	23.8	45.8	0.216	0.0150	1.33
B-0	170.8	303.5	24.2	48.3	0.239	0.0171	1.66
B-45	182.4	309.5	23.6	48.8	0.236	0.0155	1.42
B-90	172.3	300.8	24.8	51.1	0.242	0.0177	1.97
X	177.0	306.0	23.9	49.3	0.238	0.0165	1.62
C-0	156.6	282.4	25.0	50.5	0.238	0.0181	2.05
C-45	177.2	297.9	24.1	48.3	0.226	0.0181	1.98
C-90	167.7	284.9	24.1	48.8	0.231	0.0198	1.94
X	169.7	290.8	24.3	49.0	0.230	0.0185	1.99

Gage length : 25 mm
 Y.S. : Yield strength
 T.S. : Tensile strength
 n : Strain hardening exponent
 m : Strain rate sensitivity
 $X = (X_0 + 2X_{45} + X_{90}) / 4$
 ϵ_u : Uniform elongation
 ϵ_t : Total elongation
 R : Plastic strain ratio

또한 $\ln(\text{진응력}) - \ln(\text{진변형률})$ 의 관계에서 구한 직선의 기울기가 가공 경화 지수(n)인데, 인장 곡선 상의 최대 하중부의 중심 값으로 취한 균일 연신율(ϵ_u)에 해당하는 진변형률(ϵ_u)과의 일치성을 확인해보고자 Fig. 8에 평균값을 비교한 결과 모든재료에서 일치도가 좋은 편이었다. 또한 가공경화능력을 판정할 수있는 인자는 가공경화 지수외에 인장강도(S_T) / 항복강도(S_Y)의 비가 있다. 이것은 인장시험에서 직접 얻을 수 있는 자료로서 n에 비해 매우 편리하게 얻을 수 있다.

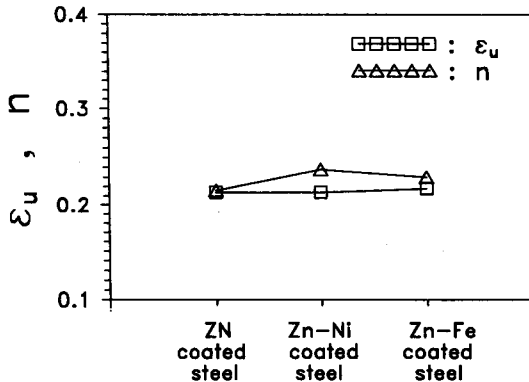


Fig. 8. Relation between strain hardening coefficient and true uniform strain.

4. 2. 도금층의 상(phase)과 형상(morphology)

Fig. 9에는 도금종류별 표면형상과 도금층의 사진을 나타냈다. 전기아연도강판(A)과 Zn-Fe(C)도금강판의 표면형상은 비입상이며, Zn-Ni(B)의 경우는 입상이 나타나며 표면에 균열이 많이 존재한다(Fig. 10). 그리고 전기아연도

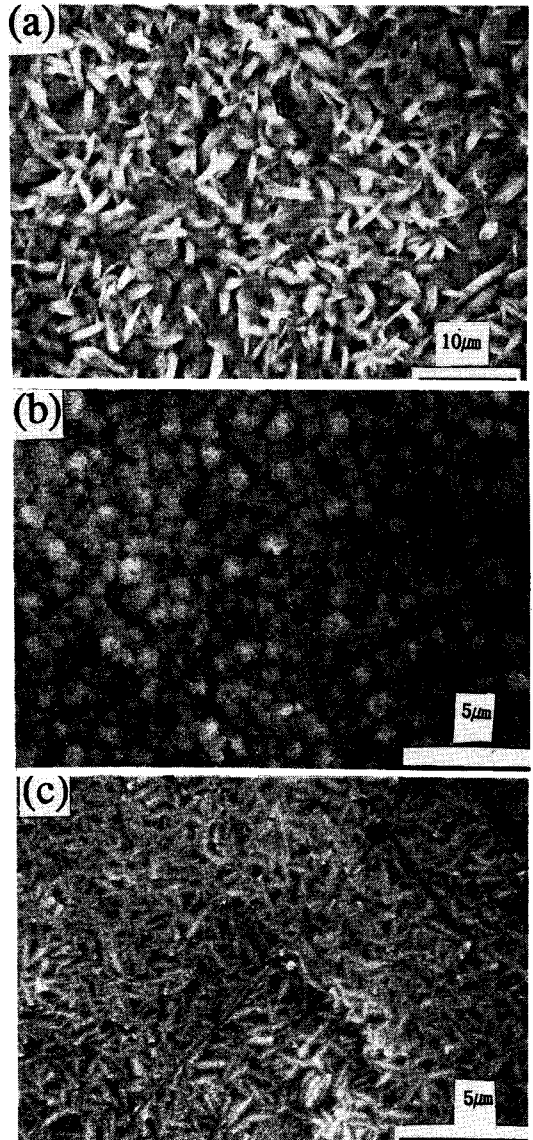


Fig. 9. SEM structures showing the surface morphology.

- (a) Zn coated steel sheet.
- (b) Zn-Ni coated steel sheet.
- (c) Zn-Fe coated steel sheet.

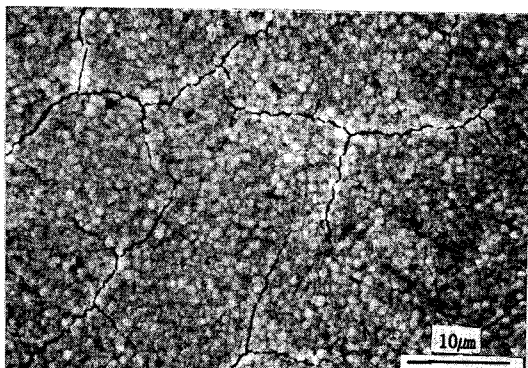


Fig. 10. SEM structure showing the surface crack of Zn-Ni coating.

시편의 경우 두께는 대략 2.8 mm 정도였다. 도금층의 단면관찰을 위해 polishing을 하여 관찰을 시도하였으나 도금층이 얇아 관찰하기 어려웠다. 때문에 액체 질소 속에서 시편을 파단시켜 그 단면을 관찰하였다. 이는 두께측정법으로는 적당치 못하지만 도금층을 확인할 수 있었고 대충 도금층의 두께를 알 수 있었다. 두 합금도금강판의 도금두께는 대략 5 mm 내외였다. 표면형상은 Zn-Ni의 경우 도금조건에 따라 변하는데 황산으로 처리를 하면 입상이, 염산으로 처리를 하면 피라미드형 표면구조를 가진다고 알려져 있다^[17]. Fig. 11a, b, c에는 도금층의 X선 분석 결과를 나타내었다. 또한 Table 3과 Table 4에서는 Zn-Fe상과 Zn-Ni상들의 종류를 나타내었다. 전기 아연도금강판의 경우는 연질인 η 상이 특히 (0002)면이 표면층에 평행하게 존재함을 확

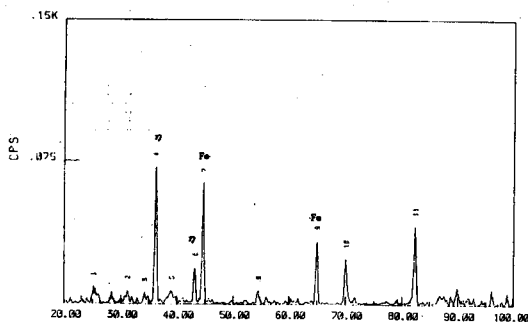


Fig. 11a. X-Ray diffraction of Zn coated steel (A) sheets.

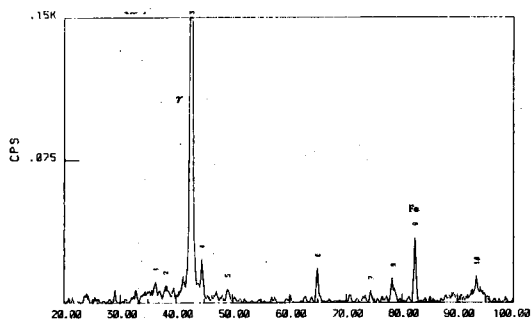


Fig. 11b. X-Ray diffraction of Zn-Ni coated steel(B) sheets.

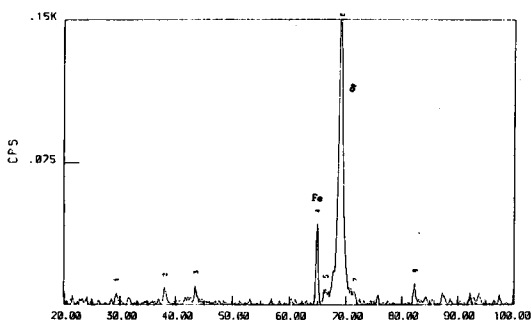


Fig. 11c. X-Ray diffraction of Zn-Fe coated steel(C) sheets.

Table 3. Zn-Fe phases

Phase	Formula	Crystal structure
η	Zn	HCP
ζ	FeZn ₁₃	Monoclinic
δ	FeZn ₇	Hexagonal
T_1	FeZn ₄	FCC
T	Fe ₃ Zn ₁₀	BCC
α	Fe	BCC

Table 4. Zn-Ni phases

Phase	Formula	Crystal structure
α	Ni	FCC
β	NiZn	FCT
γ	Ni ₅ Zn ₂₁	BCC
δ	Ni ₃ Zn ₂₂	Monoclinic

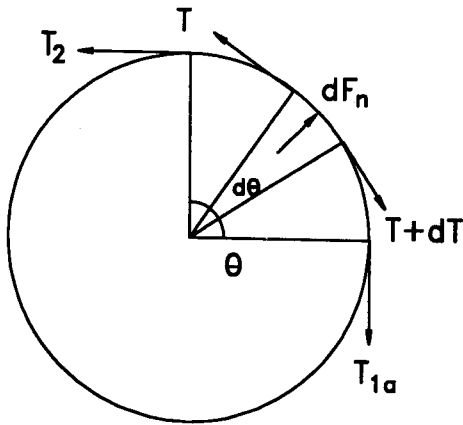
인할 수 있었는데 이러한 우선방위가 재료의 신장중에 소성유동에 바람직하다고 알려져 있다. Zn-Fe의 경우는 도금층에 Fe의 함량이 많아질 수록 δ 와 T 상이 많아지고 η 상이 줄어든다^[18].

4. 3. 마찰계수 측정

본 연구의 마찰계수 계산은 아래에 기술할 방법으로 간단히 얻을 수 있다. Fig. 12은 실험과 정동안 시편에 작용하는 힘을 개략적으로 나타낸 모식도이다. 접촉각을 θ , 가해진 전방하중 T_{1a} , 후방하중 T_2 , 굽힘효과로 인한 하중 T_{1b} , F_n 은 접촉각 중심에 가해지는 수직힘, dF_n 을 미소 수직힘, μ 를 마찰계수라 했을때 식(2)와 같은 방법으로 계산해 정리하면

$$\mu = (1/\theta) [(r+t/2)/r] \ln [(T_{1a} - T_{1b}) / T_2] \dots\dots (6)$$

이 된다. 여기서 r 은 다이반경이고 t 는 시편의 두께이다. 그리고 시편의 두께에서 전단변형이



$$\mu = \left(\frac{1}{\theta}\right) \ln \left[\frac{T_{1a} - T_{1b}}{T_2} \right]$$

- T_2 : Back tension
- T_{1a} : Forward tension
- T_{1b} : Forward tension due to bending/unbending
- θ : Angle to contact
- μ : Friction coefficient
- dF_n : Normal force increment

Fig. 12. Force relationships in strip friction testing.

일어날 것이므로 이를 고려하기 위해 다이중심에서 시편의 중심까지의길이/다이반경의 비, 즉 $(r+t/2)/r$ 인자를 곱하여 이를 보정해준 것이다. 본 연구의 마찰계수측정은 앞장에서 기술한 다이반경영역의 마찰계수 측정법과 거의 비슷하다. 이 경우는 플랜지 영역이 없으므로 2단계의 실험만이 필요하다. 제1단계에서는 굽힘효과로 인한 하중 T_{1b} 를 측정한다(Fig. 13). 이는 시편을 인장할 때 다이휠을 자유롭게 움직이게 함으로 시편과 다이휠의 마찰계수를 0으로 만들면 된다. 즉 식(6)에서 $\mu=0$ 이므로 $T_{1a} - T_{1b} = T_2$ 로 되어 전방하중, T_{1a} 은 로드셀로 하중을 측정하고 후방하중, T_2 는 스트레인 게이지를 이용해 얻음으로써 굽힘힘, T_{1b} 를 여러 접촉각에 따라 얻을 수 있다. 제 2단계는 다이휠을 움직이지 못하게 핀으로 고정시킨 채로 신장실험을 하여 전방하중과, 후방하중을 얻는다(Fig. 14). 1단계에서 얻은 굽힘힘과 식(6)을 이용하여 마찰계수를 얻을 수 있다. 윤활제는 그리스를 사용했으며 실험을 시작하기전에 항상 균일한 다이조건을 위해 #600 에머리 페이퍼로 다이표면을 균일화하고 아세톤으로 세척해 냈다. 신장속도는 인장시험기의 크로스헤드 속도 20 mm/

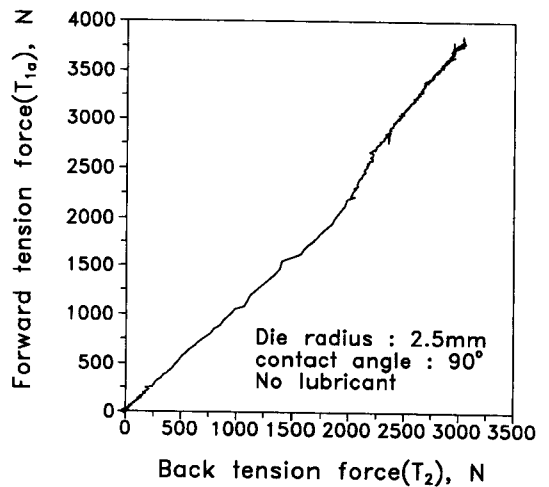


Fig. 13. Plot of forward tension as a function of back tension(unpinned) for Zn-Ni coated steel.

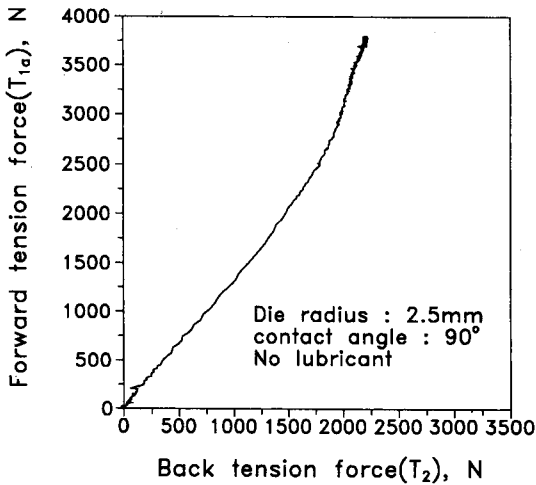


Fig. 14. Plot of forward tension as a function of back tension(pinned) for Zn-Ni coated steel.

min로 일정하게 했고 실험의 일관성을 위해 시편의 신장거리 30 mm영역에서 신장을 중단시켰다. 이때에 굽힘힘, 전방인장, 후방인장하중을 측정하여 식 (6)에 대입하여 마찰계수를 구하였다. 일반적으로 다이반경이 작아짐으로서 굽힘힘은 크게 나타났다. 이해를 돕고자 굽힘힘, 전방인장, 후방인장하중을 측정한 결과를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 13은 앞에서 언급한 1단계 실험, 즉 굽힘힘을 측정한 결과이다. 그림에서 굽힘힘(T_{1b})은 전방인장하중(T_{1a} ; 3750 N)에서 후방인장하중(T_2 ; 3050 N)을 뺀 값이 된다. 굽힘힘은 700 N으로 나타남을 알 수 있다. 그리고 다이를 핀으로 고정시키고 같은 방법으로 신장실험을 한 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 이 결과 전방인장하중(T_{1a} ; 3780 N)에서 후방인장하중(T_2 ; 2200 N)을 얻음을 그림에서 알 수 있다. 이 측정값을 식(6)에 대입해 주면 0.249값을 얻는다.

이렇게 하여 얻은 마찰계수를 Table 5에 다이 반경과 접촉각, 윤활에 따라 정리하였다. 그리고 전기아연도강판의 경우 도금층을 30%염산에 담가 화학적으로 제거하여 마찰계수를 측정해 표에 실었다. 전기 아연도강판의 도금층이

Table 5. Coefficients of friction for various die radii, contact angles, and lubrication.

material	die radius (cm)	contact angle	dry /lub	friction coefficient
Zn coated sheet (A)	0.25	90	dry	0.18~0.23
	0.25	90	lub	0.017~0.023
	0.25(bare)	90	dry	0.25~0.30
	0.25(bare)	90	lub	0.09~0.13
	0.5	45	dry	0.257~0.296
	0.5	45	lub	0.086~0.096
	0.5	90	dry	0.257~0.284
	0.5	90	lub	0.096~0.118
	0.5	135	dry	0.203~0.225
	0.5	135	lub	0.054~0.064
	2.0	90	dry	0.163~0.204
	2.0	90	lub	0.051~0.061
Zn-Ni coated sheet (B)	0.25	90	dry	0.237~0.250
	0.25	90	lub	0.093~0.110
	0.5	45	dry	0.281~0.346
	0.5	45	lub	--
	0.5	90	dry	0.227~0.270
	0.5	90	lub	0.184~0.194
	0.5	135	dry	0.281~0.30
	0.5	135	lub	0.162~0.173
Zn-Fe coated sheet (C)	0.25	90	dry	0.168~0.178
	0.25	90	lub	0.09 ~0.125
	0.5	45	dry	--
	0.5	45	lub	--
	0.5	90	dry	0.225~0.246
	0.5	90	lub	0.161~0.182
	0.5	135	dry	0.214~0.257
	0.5	135	lub	0.161~0.171
	2.0	90	dry	0.222~0.242
	2.0	90	lub	0.101~0.121

일종의 고체 윤활제로 작용하여 무도금강판보다 작은 마찰계수를 나타낸 것 같다. 이는 윤활의 경우와 윤활을하지 않은 경우에서도 마찬가지로였다. Table 5에서 보면 윤활효과가 마찰계수의 확연한 감소를 나타내는 것을 알 수있다. 윤활제가 그리스인 경우에 다이와 강판간의 경계 윤활막의 역할을 잘 하는 것 같다. 또한 마찰계수는 다이반경과 무관함을 알 수 있었는데 이는

Davies^[7]의 결과와 일치한다. 일반적으로 재료의 표면의 거칠기가 평활하다고 해서 마찰계수가 작다고 단정지울 수는 없을 것이다. 다이의 표면과 도금층 표면의 거칠기의 상호관계에 의해 결정되는 것이다. 때문에 순아연도 강판의 마찰 계수 값이 좀 작기는 하지만 이는 단정지워 결론을 내릴 수 없었다. 만일 다이표면이 평활하다면 도금표면의 돌기들이 다이의 가압에 의해 눌리고 눌린부분이 다이와 슬립을 일으켜 밀리고 진접측면적이 커져 마찰계수가 커진다. 때문에 표면의 거칠기와 도금층의 상, 도금층 종류가 마찰계수에 미치는 영향에 대한 더욱 많은 실험연구가 필요하다.

5. 결 론

1. 신장 성형시 여러가지 성형변수에 의한 마찰계수를 측정할 수 있는 마찰계수측정장치를 제작하였다.
2. 윤활, 무윤활의 모든 경우에서 무도금강판보다 전기 아연도강판의 마찰계수가 작은 값을 나타냈다.
3. 그리스 윤활제는 마찰계수 감소에 매우 큰 효과가 있었으며 도금종류에 따른 마찰계수는 다이반경 크기에 뚜렷한 영향이 없었다.

후 기

본 연구는 1991년도 포항종합제철주식회사의 연구비지원으로 연구가 진행되었기에 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. R. Zeng and D. Overby, 15th Biennial Congress IDDRG, Dearborn, Michigan, 1988, pp.85-90.
2. R. T. Fox, A. M. Maniatty and D. Lee, Met. Trans., 20a, 1989, pp.21-79.
3. S. P. Keeler, SAE Technical paper No.

- 88036, 1989, pp.22-05.
4. V.Rangarajan, N.M.Giallourakis, D.K. Matlock, and G.Krauss, J.Mat. Shap. Tech., vol.6., 4, 1989, pp.217-227.
5. W. G. Brazier, R. W. Thompson, SAE Technical paper No.850274, 1985.
6. D. J. Meuleman, D. Overby, SAE Technical paper No.880369, 1989.
7. R. G. Davies and W. S. Stewart, "Zinc-based coating system", G.Krauss and D. K.Matlock, eds., 1990, pp.243.
8. W. G. Brazier, R. W. Thompson, SAE Technical paper No.860434, 1987.
9. K. Hashimoto, T.Ohwue and M. Takita, 16th Biennial Congress IDDRG, June 11-13, 1990.
10. E. Doege, "Computer Modelling of Sheet Forming Process-Theory, Verification, and Application", N.M. Wang and S.C. Tang, eds., TMS-AIME, Warrendale, PA, 1986, 1986, pp.209.
11. J. O. Kumpulainen, A. J. Ranta-Eskola and R. H. O. Rintamaa, Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol., Vol.105, 1983, pp. 119.
12. H. D. Nine, "Mechanics of Sheet Metal Forming Material Behavior and Analysis", D.P.Koistinen and N. M. Wang, eds., Plenum, New York, 1978, pp.179.
13. S. P. Keeler and T. E. Dwyer, SAE Technical paper No.860433, 1987.
14. P. A. Stine, R. E. Seward, M. T. Beyerle and P. C. Luken, "Computer Modeling of Sheet Forming Process-Theory, Verification, and Application", N. M. Wang and S. C. Tang, eds.,TMS-AIME, Warrendale, PA, 1986, pp.107.
15. J. L. Duncan, B. S. Shabel and J. G. Filho, SAE Technical Paper No.780391, 1978.

16. D.P.Kotchman, I. Kim, C-Y. Sa and D. Lee, private communication, 1990.
17. A. R. Marner, "Zinc-based Coating System", G.Krauss and D. K. Matlock eds., 1990, pp.55.
18. T. Adaniya, T.Hara and et.al., Plating and surface finishing, August, 1985, pp. 52.