

〈논 문〉 SAE NO. 943708

컵드로잉에 의한 판재의 마찰특성 평가

A Cup Drawing Test for Measuring the Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming

김 영 석,* 최 원 집,**
Y. S. Kim, W. J. Choi

ABSTRACT

Cup drawing tests were performed to evaluate the friction characteristics of sheet metals. The linear relationship between drawing force and blank holding force obtained from the cup drawing test was used to calculate the coefficient of friction of the sheet metal. The friction coefficient was compared to that from conventional draw bead friction test. It was clarified that the cup drawing test can be used as a simple and convenient method for evaluating the friction characteristic of the sheet metal and also lubricity of the lubricant used.

주요기술용어 : Stamping Formability(스탬핑성형성), Sheet Material(판재), Cup Drawing Test(컵드로잉실험), Coefficient of Friction(마찰계수), Draw Bead Friction Test(드로오비드 마찰실험), Lubricant(윤활유)

1. 서 론

자동차 제조공정에 있어서 판재(Sheet Material)를 변형시켜 필요한 3차원 형상을 만드는 공정이 스탬핑공정이다. 이 공정에서는 대개 3 또는 4개의 연속 프레스공정을 거쳐 완성된 판넬이 제조되는데 판넬형상의 대부분은 첫번째 금형인 드로잉금형에서 결정되고 후속공정에서는 국부적인 성형, 플렌징, 트리밍등이 행해진다. 일반적으로 스탬핑공정에서 발생하는 파단, 주름, 스프링백등의 성형불량현상은 재료변수(재료의

기계적특성, 두께 및 도금층 유무등), 금형변수(금형각부의 치수 및 금형재질등) 및 공정변수(블랭크홀딩력, 윤활유성능, 금형온도등)들의 부적절한 설정에 기인한다. 이들 요인중에서도 자동차용 강판의 경우와 같이 판재의 체적(표면적×두께)에 비하여 금형과 판재의 접촉면적이 큰 프레스 공정에서는 판재의 표면에 작용하는 마찰력의 크기가 판재의 스탬핑 성형성(Stamping Formability)에 큰 영향을 미친다.¹⁻³⁾ 이는 마찰특성이 비록 재료고유의 성형한계에는 영향을 미치지 못하나 스탬핑공정에 있어서 금형과의

* 정회원, 산업과학기술연구소 가공연구실

** 산업과학기술연구소 강건재연구부

접촉면에서 마찰력의 크기가 판재의 변형률분포를 변화시켜 스템핑성형성에 큰 영향을 주는 것이다. 더욱이 최근 자동차 차체부식에 대한 대책으로 사용이 크게 증대되고 있는 Zn계 각종 도금강판의 경우는 일반 무도금 냉연강판과는 달리 도금층의 존재로 인해 스템핑공정에서 도금층의 탈락 및 손상뿐만 아니라 냉연강판과는 상당히 다른 마찰, 윤활특성을 나타내며 스템핑시에 발생하는 과단불량의 50% 이상 대부분이 마찰불량에 기인한다고 알려져 있다. 도금강판의 경우는 제조특성상 코일전체에 걸쳐 균일한 도금을 하기 어렵기 때문에 동일코일내에서도 부위별로 도금층의 표면특성-도금층의 상 구성(Phase Composition), 도금층의 경도, 표면형상(Surface Morphology) 등이 상당히 상이하여 마찰특성에 있어서 큰 편차를 나타내며, 또한 마찰특성이 윤활유 종류 및 금형온도 등에 매우 민감한 특징이 있어 스템핑조건을 안정적으로 유지하기 어려운 단점이 지적되고 있다.⁴⁻⁹⁾

판재의 마찰특성을 크롬 마찰계수(Coulomb's Coefficient of Friction)로 평가하기 위한 방법으로는 Fig.1에서와 같이 프레스공정중에 발생하는 각 변형모드를 잘 재현한 변형모드별 마찰실험방법이 각종 판재의 마찰특성 및 윤활유의 성능 평가에 널리 활용되고 있다.¹⁰⁾ 대표적인 방법으로는 평평한 금형면위에서 재료의 상대슬립이 많은 변형에 대한 마찰특성을 평가하기 위한 스트립드로오실험(Strip Draw Test), 다이 반경부위에서와 같이 재료가 인장하에서 굽힘변형을 받으며 상대슬립이 일어나는 경우에 대한 인장-굽힘실험(Bending Under Tension Test)¹¹⁾ 편치부에 접한 재료의 미소 상대슬립이 있는 경우에 대한 편치반경실험(Punch Radius Test)¹²⁾ 그리고 스템핑 다이의 블랭크 홀더면에 설정되어 있는 드로오비드부에서 재료의 굽힘-굽힘풀림의 반복변형하에서 마찰특성을 평가하기 위한 드로오비드 마찰실험(Draw Bead Friction Test)¹³⁾ 과 드로오비드 마찰실험을 응용하여 도금강판의 마찰특성을 냉연강판과 비교 평가하는 실험기술¹⁴⁻¹⁷⁾ 등이 있다. 이들 마찰실험은 실험의 수행을 위해 통상 인장시험기에 장착하여야 하는 불편

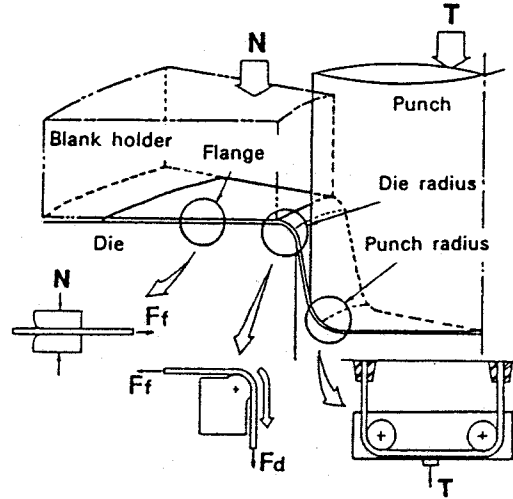


Fig.1 Friction state at each part in cup drawing process

함이 있고, 또한 여기서 구한 마찰계수는 재료 고유의 특성값이 아니고 금형소재, 금형과 판재의 표면거칠기, 윤활유의 종류와 도포량, 실험온도 및 속도, 도금강판의 경우 도금층의 표면특성등에 의존하는 시스템특성값으로 동일재료에 대한 각 실험결과는 정성적으로 잘 일치하나 절대값에 있어서 큰 차이를 보이고 있는 실정이다.⁹⁾

한편 이들 마찰시험과는 달리 종래의 컵드로잉실험(Cup Drawing Test)을 통하여 한계드로잉비(Limiting Drawing Ratio, LDR) 혹은 온전한 컵성형이 가능한 블랭크홀딩력 범위나 일정한 드로잉비에서 최대편치력의 크기가 판재의 마찰특성 및 윤활유(Lubricant)의 우열평가에 활용되고 있다.^{8,9)} 그러나 이 방법은 평가하려는 특성값이 재료의 기계적특성뿐 아니라 재료의 두께에도 크게 영향을 받고 있어 재료의 마찰특성만을 정확하게 평가할 수 없는 문제점이 있다.

본 연구에서는 인장시험기에 설치하여야 하는 위와 같은 마찰시험기에 의존하지 않고 기존의 박판종합시험기를 이용한 컵드로잉실험¹⁰⁾을 통하여 각종 판재의 마찰특성과 윤활유의 성능을 간단히 평가할 수 있는 방법을 제안하고, 컵드로잉실험에서 구해지는 마찰계수를 드로오비드 마찰실험결과와 비교하였다.

2. 이론적 고찰

Fig.2에 나타난 컵드로잉공정에서 원형으로 블랭킹된 판재는 블랭크홀딩력 하에서 펀치의 하강에 따라 플랜지부에서 원주방향으로 압축과 반경방향으로 드로잉변형을 받아 깊은 원형컵이 형성된다. 이때 플랜지 및 다이반경부에서 과도한 마찰저항이 작용하거나 재료의 한계드로잉비를 넘어 드로잉하는 경우는 컵벽부에서 파단이 발생하게 되어 원하는 컵성형이 불가능해진다. 이 컵드로잉공정에서 금형변수가 고정되어 있는 경우 펀치력은 재료변수 및 공정변수에 의해 결정된다. 한편 컵드로잉공정에서 쿠름마찰법칙이 성립한다고 가정하고 소성역학적 힘의 평형상태를 고려하면 판재의 외주에 균일하게 작용하는 블랭크홀딩력의 증가에 따라 최대펀치력은 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이 선형관계를 이용하여 컵드로잉공정에서의 재료의 마찰특성 즉 마찰계수를 구하는 방법을 이하에 설명한다.

컵드로잉공정에서 최대펀치력 T 는 재료의 소성변형력 T_d 과 마찰저항력 T_f 의 합으로 주어진다. 즉

$$T = T_d + T_f \tag{1}$$

한편 이들은 다음의 각 성분들의 합에 의해 나타낼 수 있다.

$$T_d = T_{fd} + T_{rd} + T_b + T_{ub} \tag{2}$$

$$T_f = T_{ff} + T_{rf} \tag{3}$$

여기서 T_{fd} 와 T_{rd} 는 플랜지부와 다이반경부에서의 균일변형력이고, T_b 와 T_{ub} 는 다이반경부 입구와 출구에서 굽힘력과 굽힘풀림력이다. 또한 T_{ff} 와 T_{rf} 는 플랜지부의 마찰력과 다이반경부에서의 마찰력이다. 이들 각각의 성분은 다음식으로 표시한다.

$$(i) T_{fd} + T_{rd} = A_0 K_m 1m(\beta) \tag{4}$$

여기서 $\beta (=D_o/D_i)$ 는 드로잉비이고, K_m 은 평균 유동응력이다. 또한 A_0 는 다이입구($R=D_i/2$)에서 블랭크의 단면적이다.

$$(ii) T_b = A_0 K_m t_0 / 4R_m = T_{ub} \tag{5}$$

여기서 t_0 는 판재두께이다. 또한 $R_m (=r_d + t_0/2)$ 은 평균다이반경이고 r_d 는 다이곡률 반경이다.

$$(iii) T_{ff} = 2\mu_f N / \beta \tag{6}$$

여기서 N 은 블랭크홀딩력이고, μ_f 는 플랜지부에서 마찰계수이다.

$$(iv) T_{rf} = \{exp(\mu_r \phi) - 1\} (T_{fd} + T_{rd} + T_b + T_{ff}) \tag{7}$$

여기서 ϕ 는 다이반경부에서 재료와 다이반경부와의 접촉각이고, μ_r 는 다이반경부에서 마찰계수이다. 본 연구에서는 재료가 다이반경부를 완전히 감싼다고 가정하여 ϕ 를 $\pi/2$ 로 하였다.

따라서 이들 각각의 성분을 Eq.(1)에 대입하면 최대펀치력은 다음과 같이 나타내진다.

$$T = exp(\mu_r \pi/2) (T_{fd} + T_{rd} + T_b + T_{ff}) + T_{ub} \tag{8}$$

Eq.(8)에서 블랭크홀딩력의 변화 ΔN 에 따른 최대펀치력의 변화 ΔT 는 다음과 같이 주어진다.

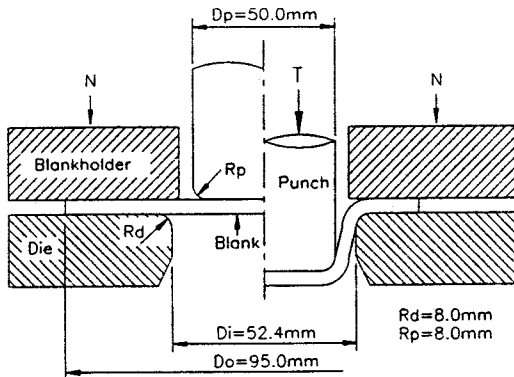


Fig.2 Cup drawing test

$$\begin{aligned} \Delta T &= \exp(\mu_s \pi / 2) (2\mu_s \Delta N / \beta) \\ &= (1 + \mu_s \pi / 2) (2\mu_s \Delta N / \beta) \end{aligned} \quad (9)$$

Eq.(9)에서 최대편치력의 변화 ΔT 는 블랭크 홀딩력의 변화 ΔN 와 플렌지부 및 다이반경부의 마찰계수 μ_s 그리고 드로잉비 β 의 함수임을 알 수 있다. 따라서 드로잉비 β 를 일정하게 하여 컵드로잉실험을 행하여 $\Delta T / \Delta N$ 의 비를 구하면 이 값이 재료의 플렌지부 및 다이부에서의 마찰 특성을 나타낸다고 볼 수 있다. 이 식에서 μ_s 와 μ_d 의 관계는 문헌[19, 20]의 실험데이터로부터 비계관계에 있다고 가정할 수 있다.

$$\mu_s = \alpha \mu_d \quad \alpha < 1 \quad (10)$$

따라서 Eq.(10)을 Eq.(9)에 대입하면 μ_s 에 관한 2차방정식을 풀면 플렌지부의 마찰계수는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\mu_s = -1 + \{1 + \pi \alpha \beta (\Delta T / \Delta N)\}^{1/2} / \pi \alpha \quad (11)$$

Eq.(11)을 이용하여 플렌지부에서 마찰계수 μ_s 를 구하기 위해서는 드로잉비 β 를 일정하게 고정하고 블랭크홀딩력을 일정한 간격으로 변화시켜가면서 그때의 최대편치력을 측정하여 블랭크홀딩력과 최대편치력과의 선형관계로부터 기울기 $\Delta T / \Delta N$ 을 구하고 적당한 α 값을 취하면 된다. α 값은 통상 문헌[19, 20]에서 알 수 있듯이 $\alpha = 1.5 \sim 3.0$ 정도의 값을 갖는다.

3. 실험방법

3.1 인장실험

실험에 사용한 재료는 현재 자동차 내·외 판넬용으로 널리 사용되고 있는 냉연강판 3종류와 Zn-Ni(Ni=11.6%), Zn-Fe(Fe=17.6%) 합금전기도금강판 각 1종으로 Table 1에 인장실험에 의한 각각의 기계적 특성을 나타내었다. 여기서 냉연강판들은 각각 조질압연롤의 표면조도 패턴을 Shot Blasting(S-B), Electrodischarge Texturing(EDT), Laser Texturing(Lasertex) 처리하여 가공된 것이다. S-B강판의 경우는 조질압연롤 표면에 적정그리드를 투사하여 가공된 것으로 그리드의 화학성분, 크기, 경도, 그리드의 속도 및 마모등의 차이에 의해 롤 조도패턴의 정밀제어가 곤란하여 불균일한 표면 조도를 갖는다. 한편 EDT나 Lasertex 강판의 경우는 전기에너지 또는 레이저에 의해 규칙적으로 가공된 롤에 의해 강판이 균일한 조도를 갖으므로 내골링성(Anti-Galling Property)과 도장 선명성(Paint Image Clarity)이 우수한 특징이 있는 것으로 알려져 있다.²¹⁾ 각 시편의 표면조도를 비접촉식 3차원 조도측정기인 Rodenstock RM600-3D 모델을 사용하여 측정하였으며 Fig.3에 그 결과를 나타내었다.

상기 강판들의 기계적 특성을 파악하기 위해 코일의 압연방향에 대해 0°, 45°, 90°의 각방향으로 ASTM E-8규격의 인장시편을 제작하여 20톤 용량의 Instron 만능 시험기에 의해 10mm/min의 일정한 속도로 인장실험을 실시하였다.

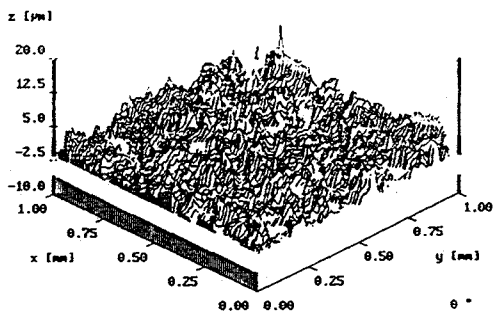
Table 1 Mechanical properties of tested materials

Material	t(mm)	YS(kg/mm ²)	TS(kg/mm ²)	EI(%)	R(15%)	n(10-20%)
S-B	0.70	15.9	30.0	46.7	1.96	0.25
EDT	0.81	17.7	30.4	44.6	1.75	0.24
Lasertex	0.78	16.3	31.1	46.4	1.96	0.24
Zn-Ni	0.65	16.9	29.1	43.8	1.81	0.22
Zn-Fe	0.82	17.4	29.6	43.3	1.54	0.21

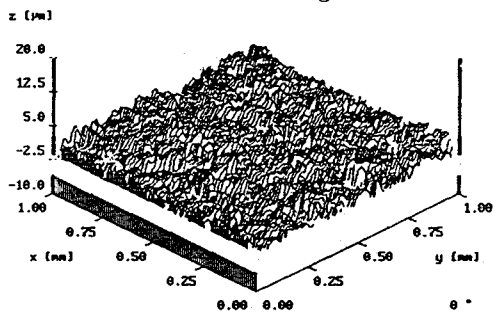
* Tensile specimen : ASTM E-8 standard,
S-B : Shot Blasting, EDT : Electrodischarge Texturing
Lasertex : Laser Texturing

가공경화지수 n 값은 Holloman의 식, $\sigma = K\epsilon^n$ 을 이용하여 연신률이 10%~20% 사이에서 결정하였다. 여기서 σ 는 진응력, ϵ 는 소성변형률, K 는 소성계수이다. 한편 소성이방성계수 R 값은 연신률 15%에서 폭방향 변형률 ϵ_w , 길이방향 변형률 ϵ_l 을 정밀측정하여 다음식으로 구하였다.

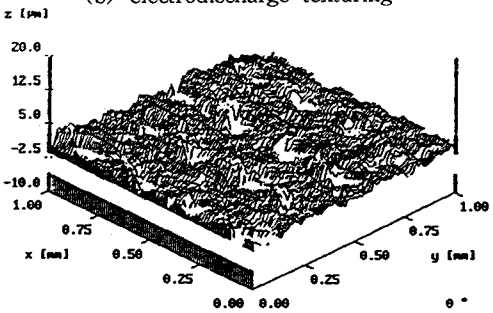
$$R = \epsilon_w / \epsilon_l = -\epsilon_w / (\epsilon_w + \epsilon_l) \quad (12)$$



(a) $R_a=0.95\mu\text{m}$, $R_{max}=8.87\mu\text{m}$
(a) shot blasting



(b) $R_a=0.94\mu\text{m}$, $R_{max}=7.54\mu\text{m}$
(b) electrodischarge texturing



(c) $R_a=0.82\mu\text{m}$, $R_{max}=8.74\mu\text{m}$
(c) laser texturing

Fig.3 : 3-dimensional measurements of surface roughnesses

여기서 ϵ_l 는 두께방향 변형률이다. Table 1의 기계적 특성값은 각 방향의 값의 평균값을 나타낸다.

3.2 컵드로잉실험

컵드로잉실험은 60/40톤 유압식 박판종합시험기를 이용하였으며 드로잉비는 재료의 한계드로잉비보다 적은 1.9로 하였고 드로잉속도는 약 80 mm/min로 하였다. 다이 및 펀치의 형상은 Fig.2에 나타낸 것과 같으며 여기서 펀치 직경은 50mm, 다이 내경은 52.4mm로 하여 다이 내경과 펀치의 경간의 간격을 충분히 유지하여 드로잉된 컵벽에서 재료의 아이어닝이 일어나지 않도록 하였으며 펀치 및 다이 코너 반경은 모두 8.0mm로 하였다. 컵드로잉실험은 평가하려는 판재에 윤활유를 도포한 후 블랭크홀딩력을 2.0톤으로 부터 약 0.5톤 간격으로 증가시켜가면서 파단 발생때까지 수행하였으며 각 실험에서 펀치행정과 펀치력의 관계를 X-Y 좌표상에 출력하여 최대 펀치력을 결정하였다. 이 실험 데이터로부터 블랭크홀딩력과 최대 펀치력의 관계를 구하여 마찰계수 μ 를 도출하였다. 또한 컵드로잉실험에서 윤활유의 점도에 따른 마찰특성의 영향평가를 위해 스탬핑공정에서 사용하고 있는 3종류의 윤활유-저점도 방청유(2.2cSt/40°), 중점도 가공유(20cSt/40°), 고점도 방청유(41cSt/40°)를 도포하여 비교실험을 하였다.

3.3 드로오비드 마찰실험

본 연구에서 제안한 컵드로잉실험에서 신뢰성 있는 마찰계수를 구하기 위해서는 Eq.(10)에서 비례상수 α 에 대한 적절한 값을 택하는 것이 중요하므로 비교실험으로 드로오비드 마찰실험을 행하여 비례상수 α 값을 결정하였다.

드로오비드 마찰실험은 당 연구실에서 사용하고 있는 기존의 Nine에 의해 고안된 장치¹⁹⁾를 보완하여 개발한 고속 드로오비드 마찰시험기²⁰⁾를 활용하였다. 동 장치는 마찰실험의 수행과 드로잉력-드로잉거리에 대한 데이터가 컴퓨터에 의해 자동처리 되고 종래의 마찰실험기와는 달리 인장시험기에 부착하지 않고 단독으로 실

협수행이 가능한 특징이 있다. 또한 Fig.4에 나타난 것과 같이 시편의 드로잉이 수평면에서 45°까지 경사지게 가능하여 스탬핑공정에서 재료의 마찰거동을 보다 정확하게 재현할 수 있으며 드로잉속도를 최대 1100mm/min까지 무단변속이 가능한 특징이 있다. 한편 본 마찰실험기를 이용한 반복실험에 대한 마찰계수의 실험오차는 ± 0.002 이내로 작아 재현성이 매우 우수하다.

마찰실험은 먼저 시편을 코일의 압연방향으로 폭 45mm×길이 600mm 크기로 절단하여 가장 자리의 버어를 완전히 제거하고 시편의 표면의 이물질과 기름을 닦아내고 평가하려는 윤활유를 도포후 한쪽 끝을 드로잉척에 체결한다. 실험은

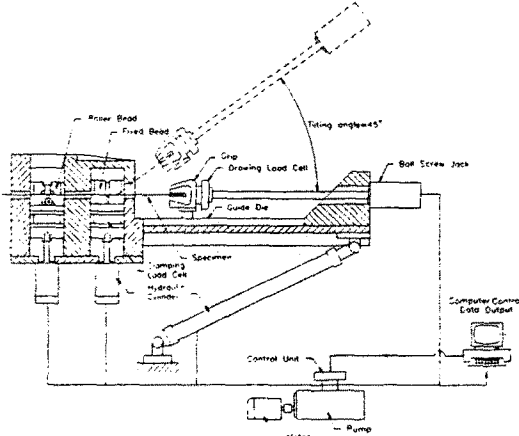


Fig.4 Schematic view of draw bead friction tester

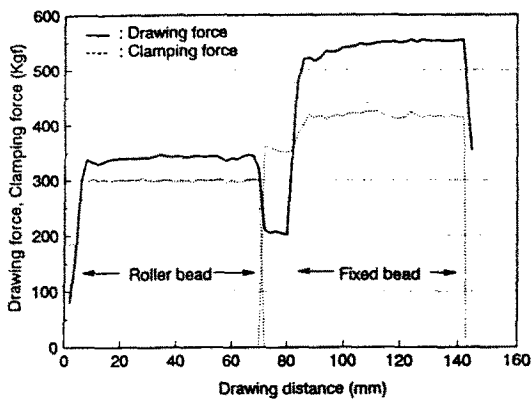


Fig.5 Typical drawing force versus drawing length curve obtained in draw bead friction test

컴퓨터제어에 의해 롤러비드의 가압-70mm 드로잉-해체 그리고 고정비드의 가압-70mm 드로잉-해체 순으로 연속적으로 자동 수행되며 이때 드로잉거리에 따라 각 비드의 가압력과 드로잉력이 컴퓨터 모니터상에 Fig.5와 같이 출력된다. 드로잉거리는 드로잉척에 연결된 모터의 회전수로 부터 계산되고 비드의 가압력과 드로잉력은 각각의 로드셀(load cell)로 부터 나오는 신호를 처리하여 구하였다. 시편의 쿨룸마찰계수 μ 는 롤러비드와 고정비드에 걸리는 각각의 가압력과 드로잉력의 최대값을 이용하여 다음식으로 부터 자동계산된다.

$$\mu = (T_{f+d} - T_d) / \pi N_{f+d} \quad (13)$$

여기서 T_{f+d} 는 고정비드에서의 드로잉력, T_d 는 롤러비드에서의 드로잉력이고 N_{f+d} 는 고정비드에서의 가압력이다. 비드의 반경은 4.76mm이고 재질은 Vickers 경도계로 610(Hv100g) 정도인 SKD11 공구강을 이용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig.6은 표면조도패턴을 달리한 냉연강판 3종에

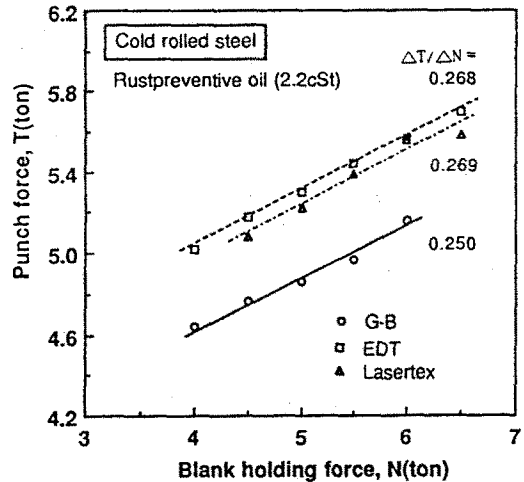


Fig.6 Punch force versus blank holding force curve for 3 different cold-rolled steel sheets

대해 저점도 윤활유를 도포한후 컵드로잉실험에서 구한 블랭크홀딩력과 최대편치력의 관계를 나타낸다. 각 시편에서 블랭크홀딩력의 증가에 따라 최대편치력이 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 실험데이터를 회귀직선식으로 표시하여 직선의 기울기, 즉 최대편치력증가/블랭크홀더증가의 비, $\Delta T/\Delta N$ 를 구하여 Eq.(11)에 대입하고 비례상수 α 를 1.5-3.0 범위에서 적당한 값으로 가정하면 쿠롬마찰계수가 얻어진다.

마찰계수는 α 값의 크기에 따라 달라지는데 α 값을 크게 선정하면 마찰계수가 작게 평가되고 α 값을 작게 선정하면 마찰계수가 크게 평가된다. 본 연구에서는 문헌[19]의 실험데이터와 드로오비드 마찰실험결과⁶⁾를 고려하여 α 값을 1.5로 택하였다.

Fig.7에 냉연강판 3종에 대해 컵드로잉 실험결과로부터 계산한 마찰계수와 드로오비드 마찰실험에서 얻어진 마찰계수의 비교를 나타낸다. 조도패턴을 달리한 냉연강판의 경우 드로오비드 마찰실험에서는 Lasertex 강판의 마찰계수가 다른 강판보다 약간 낮게 평가되고 있는 반면 컵드로잉실험의 경우는 S-B 강판이 다른 강판들보다 약간 낮게 평가되고 있음을 알 수 있다. 그러나 전반적으로 조도패턴 변화에 따른 마찰계수의 차이는 그리 크지않고 양 실험결과는 큰 차이없이 잘 일치하고 있어 컵드로잉실험이 강판의 마찰계수 평가에 유익함을 알 수 있다.

Fig.8은 Zn-Ni 합금전기도금강판에 윤활유를 변경하여 컵드로잉실험한 결과를 나타낸다. 무도유한 경우에는 마찰상태가 나빠 실험에서의 불규칙적인 편치력 증가로 인해 블랭크홀딩력과 최대편치력간의 선형관계로 부터 벗어난 데이터가 일부 존재하는 경향이 있으나, 윤활유의 점도가 높아질수록 블랭크홀딩력과 최대 편치력간의 선형관계가 잘 얻어지고 있음을 알 수 있다. 또한 윤활유점도가 높아질수록 양자간의 직선의 기울기는 점차 감소하고 있어 컵드로잉실험에 있어서 재료의 마찰특성이 개선되고 있음을 알 수 있다.

Fig.9는 Zn-Ni 합금전기도금강판에 대해 컵

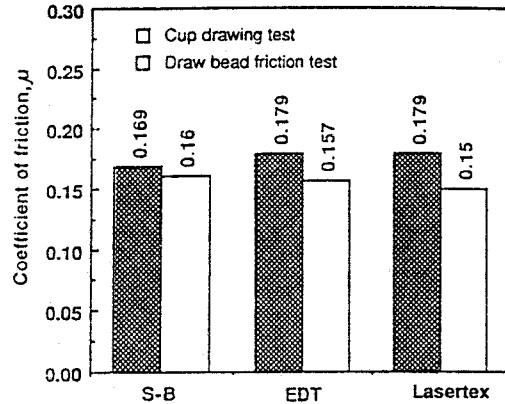


Fig.7 Comparison of friction coefficient between calculation from cup drawing test and measurement from draw bead friction test for 3 different cold-rolled steel sheets

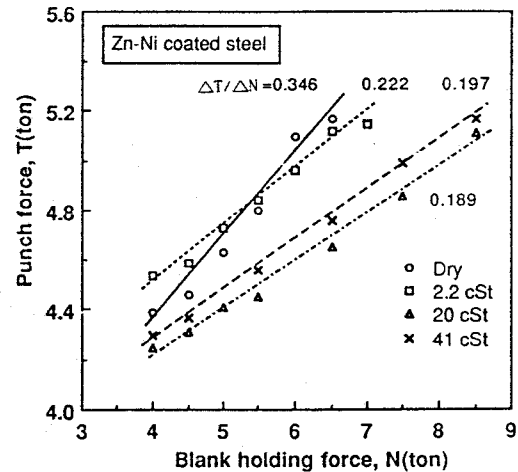


Fig.8 Punch force versus blank holding force curve for electro Zn-Ni alloy coated steel sheet

드로잉실험에서 계산한 마찰계수와 드로오비드 마찰실험에서 얻어진 마찰계수의 비교를 나타낸다. 그럼으로부터 양 실험결과는 모두 윤활유의 도포에 따라 마찰계수가 급격히 감소하고 있으나 윤활유의 점도차이에 대해서는 별로 큰 변화를 보이고 있지 않음을 알 수 있다.

한편 컵드로잉실험에서는 무윤활상태에서 큰

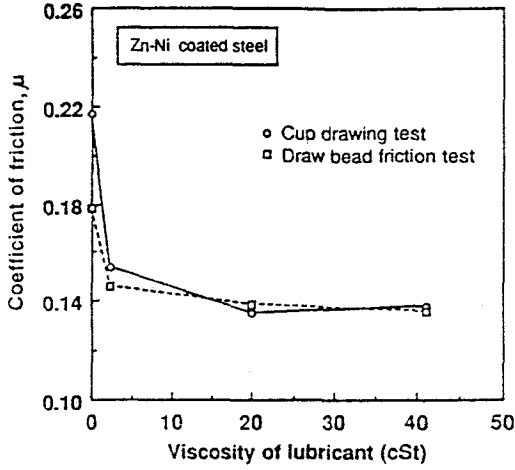


Fig.9 Comparison of friction coefficient between calculation from cup drawing test and measurement from draw bead friction test for electro Zn-Ni alloy coated steel sheet

마찰계수를 갖고 윤활유 도포에 따라 마찰계수가 큰 차로 감소하여 마찰특성이 크게 개선되는 것을 보이고 있는 반면 드로오비드 마찰실험의 경우는 무윤활상태와 윤활유도포상태에서의 마찰계수의 차이가 컵드로잉 실험결과만큼 크지 않음을 보이고 있다. 이는 무윤활상태에서의 컵드로잉 실험에서는 판재의주에서 재료의 유입에 대한 마찰저항이 커져 다이반경부에서 인장하의 굽힘변형시에 작용하는 다이반경부의 압력이 과다해져 다이반경부에서의 마찰저항이 판재전체의 마찰 특성불량을 더욱 증폭시키기 때문으로 생각된다.

Fig.10은 Zn-Fe 합금전기도금강판에 윤활유를 변경하여 컵드로잉실험한 결과를 나타낸다. Zn-Fe 합금전기도금강판의 경우는 Fig.8의 Zn-Ni 합금전기도금강판과 비교하면 블랭크홀딩력과 최대편치력간의 선형관계로 부터 벗어난 데이터가 상당수 존재하고 있으나 전반적으로 윤활유 점도증가에 따라 직선의 기울기가 점차 감소하여 재료의 마찰특성이 개선되고 있음을 보이고 있다.

Fig.11은 Zn-Fe 합금전기도금강판에 대해 컵드로잉실험에서 계산한 마찰계수와 드로오비드 마찰실험에서 얻어진 마찰계수의 비교를 나타낸다. Zn-Fe 합금전기도금강판의 경우는 Fig.8의

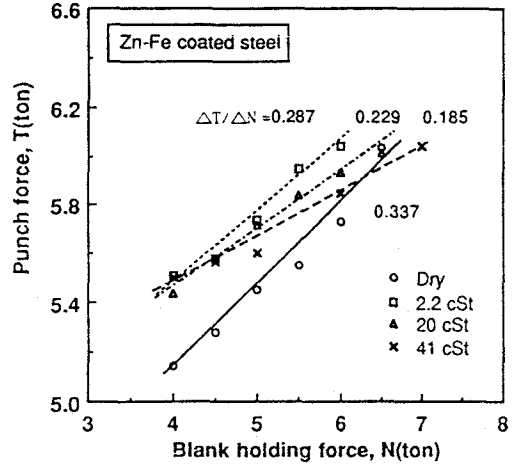


Fig.10 Punch force versus blank holding force curve for electro Zn-Fe alloy coated steel sheet

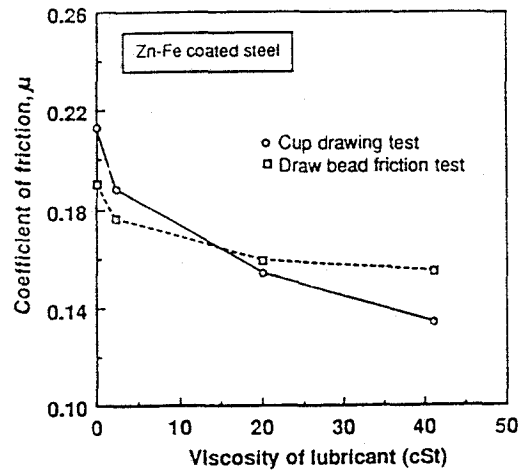


Fig.11 Comparison of friction coefficient between calculation from cup drawing test and measurement from draw bead friction test for electro Zn-Fe alloy coated steel sheet

Zn-Ni 합금전기도금강판과는 달리 윤활유의 점도가 높아질수록 마찰계수가 감소하는 특성을 보이고 있다. 한편 마찰계수의 절대값에 있어서 컵드로잉 실험결과는 드로오비드 마찰실험결과와 차이가 있으나 전반적인 경향은 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 박판중합시험기를 이용한 컵드로잉실험을 통하여 각종 판재의 마찰특성과 윤활유의 성능을 간단히 평가할 수 있는 방법을 제안하였고, 컵드로잉실험에서 구해지는 마찰계수를 드로오비드 마찰실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 즉 드로잉비를 일정하게 하고 컵드로잉실험을 행하여 최대편치력/블랭크홀딩력의 비를 구하고 비례상수 α 값으로 드로오비드 마찰실험결과와 비교하여 적절한 값을 택하면 재료의 마찰계수를 도출할 수 있는 본 방법은 재료의 마찰특성, 윤활유의 성능 및 우열평가에 매우 유익함을 보였다.

후 기

본 연구에 시편을 제공하여 주신 포항제철소 냉연부 담당자와 실험을 수행하고 정리를 도와준 김정철씨께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. F. A. Bowden and D. Tabor, "The friction and lubrication of solids", Oxford Press, 1954.
2. W. R. D. Wilson, "Friction and lubrication in sheet metal forming", in *Mechanics of Sheet Metal Forming: Behaviour and Analysis*, D. P. Koistinen and N. W. Wang(ed.), Plenum Press, New York, pp.157-177, 1978.
3. J. A. Schey "Tribology in metal working: friction, lubrication and wear", American Society for Metals, Metal Park, OH, 1983.
4. D. J. Meuleman, S. G. Denner and F. L. Cheng, "The effect of zinc coatings on the formability of automotive sheet steels", SAE paper, No. 840370, 1984.
5. S. P. Keeler, "Evaluating the lubricity of press shop lubricants on various types of galvanized steels", *Proceeding of 28th Mechanical Working and Steel Processing Conf.*, Pittsburgh, Pennsylvania, Vol.24, pp.193-198, 1987.
6. 김영석, 남재복, 최원집, "자동차용 표면처리 강판의 마찰특성에 관한 연구", *대한기계학회논문집*, Vol.14, No.6, pp.1474-1486, 1990.
7. 김영석, 조재익, 박기철, "Zn-Ni계 합금도금 강판의 마찰특성에 관한 연구", *대한기계학회논문집*, Vol.15, No.6, pp.1807-1818, 1991.
8. M. F. Shi and D. J. Meuleman, "An evaluation of interface friction in different forming modes for coated steel sheets", SAE paper, No.920633, 1992.
9. J. Iwaya, Y. Okano and M. Miyahara, "A study of the frictional behaviour of coated steel sheets", *Proc. of 16th IDDRG Biennial Cong.*, Borlange, Spain, pp.189-196, 1990.
10. ASTM standard, 1982, "Standard practice for evaluating sheet metal forming lubricant", ASTM standard D4173.
11. M. Sulonen, P. Eskola, J. Kampulainen and A. Ranta-Eskola, "A reliable method for measuring the friction coefficient in sheet metal forming", *Proc. of IDDRG Working Group III*, WG 3/5/81, 1981.
12. J. L. Duncan, B. S. Shabel and J. G. Filho, "A tensile strip test for evaluating friction in sheet metal forming", SAE paper, No.780391, 1978.
13. H. D. Nine, "The applicability of Coulomb friction to draw beads in sheet metal forming", *J. of Applied Metalworking*, Vol.2, No.3, pp.200-210, 1982.
14. Youngsuk Kim and Wonjib Choi, "A study of the method of evaluation of the frictional characteristics of Zn-Ni coated steel sheets", *J. of Materials Processing Technology*, Vol.36, pp.187-197, 1993.
15. Youngsuk Kim and Wonjib Choi, "New evaluation method for frictional characteristics of zinc coated steel sheets", *Proc. of 17th IDDRG Biennial Cong.*, Shenyang, China, pp.368-375, 1992.
16. H. D. Nine, Private communication, 1991.

17. D. K. Matlock, Private communication, 1991.
18. S. Y. Chung and H. W. Swift, "Cup drawing from flat blank", Proc. Inst. Mech. Eng.(London), Vol.65, pp.1990-223, 1951.
19. N. Iwata, N. Matsui and M. Gotoh, "An elastic-plastic analysis of square cup drawing process", Vol.33, No.381, pp.1202-1207, 1992.
20. P. A. Stine, R. E. Seward, M. T. Beyerle and P. C. Luken, "CAE sheet metal formability model-predictive capability improved with experimentally derived input data", in Computer Modelling of Sheet Metal Forming Processes : Theory, Verification and Application, N. M. Wang and S. C. Tang(ed.), Metallurgical Society, Pennsylvania, pp.107-120, 1985.
21. C. Marique, J. Crahay and A. Bragard, "Surface roughness and user properties of cold rolled steel sheets", in Developments in the Drawing of Metals, The Metal Society, 1983, pp.242-248.
22. 김영석, 김정철, "고속드로오비드 마찰시험기의 개발", 산업과학기술 미공개자료, 1992.