

변형모드별 판재의 마찰특성 비교

김 영 석, 김 기 수
산업과학기술연구소 가공연구실

Comparison of Friction Coefficients of Sheet Materials in Various Deformation Modes

Youngsuk Kim, Kisoo Kim
Metal Forming Laboratory, RIST

Abstract

Cup drawing test and U-bending test were performed to evaluate the friction characteristics of sheet materials for the different deformation modes involved in stamping process. The coefficient of friction calculated from the each test was compared to that obtained from the draw bead friction test. It was clarified that the cup drawing test could be simply used for evaluating the friction characteristic of sheet material in deep drawing process with high contacting pressure. However the U-bending test is suitable to evaluate the frictional characteristic of sheet material in bending process with low contacting pressure.

Key Words : Coefficient of Friction(마찰계수), Deformation Mode(변형모드), Cup Drawing Test(컵드로잉실험), U-Bending Test(U형 굽힘실험), Draw Bead Friction Test(드로오비드 마찰실험)

1. 서 론

자동차 제조공정에 있어서 판재를 변형시켜 필요한 3차원 형상을 만드는 공정이 스탬핑공정이다. 자동차용강판의 경우와 같이 판재의 체적(표면적×두께)에 비하여 금형과 판재의 접촉면적이 큰 스탬핑공정에서는 판재의 표면에 작용하는 마찰력의 크기가 판재의 기계적성질 못지않게 스탬핑성형성(stamping formability)에 큰 영향을 미친다⁽¹⁻³⁾. 이는 마찰특성이 비록 재료고유의 성형한계에는 영향을 미치지 못하나 스탬핑공정에 있어서 금형과의 접촉면에서 마찰력의 크기가 판넬의 변형률분포를 변화시켜 스탬핑성형성에 큰 영향을 주기 때문이다. 따라서 스탬핑 공정에서의 판재의 마찰특성을 사전

에 정확히 파악하는 것은 플랜지부에서의 과도한 마찰저항에 의한 파단불량 혹은 너무 작은 마찰저항이 작용하는 경우에 발생하는 좌굴불량등의 발생을 억제하고 요구하는 형상의 제품을 얻기위해 매우 중요한 일이다.

통상 스탬핑 공정에서 판재는 복잡한 변형모드를 경험하게되고 이들 변형모드는 대표적으로 장출변형, 드로잉변형 그리고 이들의 경계를 이루는 평면변형으로 분류되고 있다. 실제 스탬핑공정에서 재료가 겪는 복잡한 변형모드를 모두 고려한 하나의 마찰특성평가 실험방법은 존재하지 않는 실정이고, Fig.1에 대표적으로 나타낸바와 같이 각각의 변형 모드별로 판재의 거동을 잘 재현한 마찰실험방법이 각종 판재의 마찰특성 및 윤활유의 성능평가에 널리 활용되고 있다⁽⁴⁾. 대표적인 방법으로는 평평한 금형면위에서 재료의 상대슬립이 많은 변형에 대한 마찰특성을 평가하기 위한 스트립드로오실험(strip draw test)⁽⁵⁾, 다이반경부위에서와 같이 재료가 인장하에서 굽힘변형을 받으며 상대슬립이 일어나는 경우에 대한 인장-굽힘실험(bending under tension test)⁽⁶⁾, 완만한 곡률을 갖는 평평한 펀치부에 접한 재료의 미소 상대슬립이 있는 경우에 대한 펀치반경실험(punch radius test)⁽⁷⁾ 그리고 스탬핑다이의 블랭크 가압면에 설정되어 있는 드로오비드부에서 재료의 굽힘-굽힘풀림의 반복변형하에서 마찰특성을 평가하기위한 드로오비드 마찰실험(draw bead friction test)⁽⁸⁾등이 있으며, 또한 펀치장출회전실험(punch stretch rotation test)⁽⁹⁾ 그리고 드로오비드 마찰실험을 응용하여 도금강판의 마찰특성을 냉연강판과 비교평가하는 실험기술^(10,11) 등이 있다. 이들 마찰실험은 실험의 수행을 위해 통상 인장시험기나 전용실험기를 이용하여야하는 단점이 있다. 또한 여기서 구한 마찰계수는 재료고유의 특성값이 아니고 금형재질, 판재의 표면거칠기 및 표면처리유무, 금형곡률, 접촉압력, 윤활정도, 실험온도, 슬립속도및 거리, 그리고 변형크기등에 복합적으로 의존하는 시스템특성값⁽¹²⁻¹⁵⁾으로 동일판재에 대한 실험일지라도 실험방법에 따라 실험결과는 마찰특성의 절대값에 있어서 큰 차이를 보이고 있는 실정이다⁽¹⁶⁾.

한편 이들 마찰시험과는 달리 종래의 컵드로잉실험(cup drawing test)⁽¹⁷⁾을 통하여 한계드로잉비 (limiting drawing ratio, LDR) 혹은 온전한 컵성형이 가능한 블랭크가압력 (blank holding force, BHF) 범위나 일정한 드로잉비에서 최대펀치력의 크기가 판재의 마찰특성 및 윤활유의 우열평가에 활용되고 있다^(5,15). 그러나 이 방법은 평가하려는 특성값이 재료의 기계적특성뿐 아니라 재료의 두께에도 크게 영향을 받고있어 재료의 마찰특성만을 정확하게 평가할 수 없는 문제점이 있다.

본 연구에서는 Fig.1에서 나타낸바와 같은 대표적인 변형모드하에서 판재의 마찰특성을 평가하기위해 기존의 박판종합시험기를 이용한 컵드로잉실험^(17,18) 과 U-굽힘실험을 실시하였고 각각의 마찰실험에서 구한 쿨롬마찰계수(Coulomb's friction coefficient)를 전자동 드로오비드 마찰시험기⁽²¹⁾에 의한 실험결과와 비교하였다.

2. 이론적고찰

Fig.2와 Fig.3은 각각 드로잉변형과 굽힘변형을 받는 판재의 마찰특성을 평가하기 위한 컵드로잉실험과 U-굽힘실험의 개요를 나타낸다. 컵드로잉실험에서는 원형으로 블랭

킹된 판재가 블랭크가압력 하에서 원통형 펀치의 하강에 따라 플랜지부에서 원주방향으로 압축과 반경방향으로 드로잉변형을 받으면서 깊은 원형컵으로 성형된다. 한편 U-굽힘실험에서는 사각시편이 블랭크가압력 하에서 U 자형의 채널로 성형된다. 이들 실험에 있어서 플랜지부 및 다이곡률반경부에서 과도한 마찰저항이 작용하거나 재료의 가공한계를 넘어 가공되는 경우는 성형제품의 벽부에서 파단이 발생하게 되므로 성형할 재료의 마찰특성을 정확히 파악하는 것은 매우 중요한 일이다.

이하에 컵드로잉실험과 U-굽힘실험으로부터 판재의 마찰특성을 구하는 방법을 설명한다. 이들 실험에서 금형변수 (금형형상, 다이곡률반경 등)가 고정되어 있는 경우 펀치력은 재료변수 (판재의 인장특성, 크기 등) 및 공정변수 (마찰특성, 가공속도 등)에 의해 결정된다. 따라서 각각의 성형실험공정에 대해 소성역학적 힘의 평형상태를 고려하여 플랜지부에서 판재표면에 작용하는 블랭크가압력과 마찰력 그리고 다이곡률반경부에서의 굽힘력과 마찰력의 상관관계로 부터 펀치력을 구하고 이들 값의 관계로 부터 판재의 쿠름 마찰계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

즉 각각의 실험공정에서 최대펀치력 T 은 재료의 소성변형력 T_d 과 마찰저항력 T_f 의 합으로 주어진다.

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

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 각각 플랜지부와 다이곡률반경부에서의 변형력이고, T_b 와 T_{ub} 는 다이곡률반경부의 입구와 출구에서 굽힘력과 굽힘풀림력이다. 또한 T_{ff} 와 T_{rf} 는 플랜지부의 마찰력과 다이곡률반경부에서의 마찰력이다. 이들 각각의 성분은 재료를 강소성체로 가정하고 가공공화를 무시하면 Table 1에서와 같이 나타내진다.

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

$$T = \exp(\mu_r \pi / 2)(T_{fd} + T_{rd} + T_b + T_{ff}) + T_{ub} \tag{4}$$

2.1 컵드로잉실험에 의한 마찰계수 도출방법

Eq. (4)에서 블랭크가압력의 변화 ΔN 에 따른 최대펀치력의 변화 ΔT 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta T &= \exp(\mu_r \pi / 2)(2\mu_f \Delta N / \beta) \\ &= (1 + \mu_r \pi / 2)(2\mu_f \Delta N / \beta) \end{aligned} \tag{5}$$

Eq. (5)에서 최대펀치력의 변화 ΔT 는 블랭크가압력의 변화 ΔN 와 플랜지부 및 다이반경부

의 마찰계수 μ_t , μ_r 그리고 드로잉비 β 의 함수임을 알 수 있다. 따라서 드로잉비 β 를 일정하게하고 컵드로잉실험을 행하여 $\Delta T/\Delta N$ 의 비를 구하면 이 값은 재료의 기계적 특성 및 두께등의 영향을 받지않고 재료의 플랜지부 및 다이부에서의 마찰특성만을 나타낸다고 볼 수 있다. 문헌[19,20]의 실험데이타로부터 μ_t 와 μ_r 간에 선형비례관계를 가정하면

$$\mu_r = \alpha \mu_t, \quad \alpha > 1 \tag{6}$$

따라서 컵드로잉실험에서 플랜지부의 마찰계수 μ_t 는 다음식으로 구해진다.

$$\mu_t = [-1 + \{1 + \pi \alpha \beta (\Delta T/\Delta N)\}^{1/2}] / \pi \alpha \tag{7}$$

여기서 α 값은 통상 문헌 [19,20]에서 알수있듯이 $\alpha=1.5-3.0$ 정도의 값을 갖는다.

2.2 U-굽힘실험에 의한 마찰계수 도출방법

U-굽힘실험으로 부터 재료의 기계적특성 및 두께의 영향을 받지않고 판재의 마찰특성을 평가하기위해서 평가하려는 판재의 두께 t_0 보다 약간 두꺼운 판재, $t=t_0+\delta$ ($0<\delta<1.0\text{mm}$),를 블랭크가압면에 삽입하여 행하는 부가적인 실험이 요구된다. 이 경우 블랭크가압력은 플랜지부에서 판재에 가해지지 않으므로 ($N=0$) 플랜지부의 마찰력은 영이 되고, 판재는 펀치의 하강에 따라 다이곡률반경부에서 굽힘변형력과 마찰력만을 받게 된다.

따라서 블랭크가압력이 작용하는 경우의 펀치력 T 와 블랭크가압력이 작용하지 않는 경우의 펀치력 T^* 의 차이 ΔT 는 다음과 같다.

$$\Delta T = T - T^* = (1 + \mu_r \pi / 2) 2 \mu_t t N \tag{8}$$

Eq.(6)과 Eq.(8)로 부터 U-굽힘실험에서 플랜지부의 마찰계수 μ_t 는 다음식으로 구해진다.

$$\mu_t = [-1 + \{1 + \pi \alpha (\Delta T/N)\}^{1/2}] / \pi \alpha \tag{9}$$

3. 실험방법

3.1 실험판재

실험에 사용한 판재는 자동차 내,외 판넬용으로 널리 사용되고있는 냉연강판(cold-rolled steel sheet, CR), Zn-Ni 전기합금도금강판(electro Zn-Ni alloyed coated steel sheet)과 Zn-Ni 전기합금도금강판위에 약 $1\mu\text{m}$ 두께의 얇은 실리케이트 유기피막을 입혀 내식성및 마찰특성을 향상시킨 유기피복강판(organic film coated steel sheet)이다. Table 2에 인장실험에 의한 각각의 기계적특성을 나타내었다.

3.2 컵드로잉실험

컵드로잉실험에서 마찰계수를 구하기 위해서는 드로잉비 β 를 일정하게 고정하고 블랭

크가압력을 19.93kN으로 부터 약 4.98kN 간격으로 증가시켜 가면서 파단발생때까지 수행하여 각 실험에서 최대펀치력을 측정하고 블랭크가압력과 최대펀치력과의 선형관계로 부터 기울기 $\Delta T/\Delta N$ 을 구하고 적당한 α 값을 Eq.(7)에 대입하면 된다. 컵드로잉실험은 유압식복동 박판종합시험기를 이용하였으며 드로잉비는 재료들의 한계드로잉비보다 적은 1.9로 하였고 펀치속도는 약 100mm/min로 하였다. 다이 및 펀치의 치수는 Fig.1에 나타낸것과 같으며 여기서 다이내경과 펀치외경간의 간격을 충분히 유지하여 드로잉된 컵벽에서 재료의 아이어닝이 일어나지 않도록 하였다.

3.3 U-굽힘실험

U-굽힘실험에서 마찰계수 μ_r 는 컵드로잉실험에서와 같이 플랜지부에 작용하는 블랭크가압력을 일정하게하고 판재에 블랭크가압력이 가해지는 통상의 굽힘실험을 수행하고 또한 블랭크가압면에 판재두께보다 약 0.3mm 정도 두꺼운 판재를 삽입하여 블랭크가압력이 플랜지부에서 판재에 작용하지 않도록하는 부가적인 굽힘실험을 각각 수행하여 구한 최대펀치력및 블랭크가압력을 Eq.(9)에 대입하면 구해진다.

3.4 드로오비드 마찰실험

드로오비드 마찰실험은 Nine에 의해 고안된 장치⁽⁸⁾를 보완하여 개발한 Fig.4에 나타낸 전자동 드로오비드 마찰시험기⁽²¹⁾를 활용하였다. 동 장치는 마찰실험의 수행과 드로잉력-드로잉거리에 대한 데이터가 컴퓨터에 의해 자동 처리되고 종래의 마찰실험기와는 달리 인장시험기에 부착하지 않고 단독으로 실험수행이 가능하다. 또한 Fig.4에 나타낸 것과 같이 시편의 드로잉이 수평면에서 45° 까지 경사지게 가능하여 스템핑공정에서 재료의 마찰거동을 보다 정확하게 재현할 수 있으며 드로잉속도를 최대 1100mm/min 까지 무단변속이 가능하고 마찰계수의 실험오차는 +0.002 이내로 작아 재현성이 매우 우수한 특징이 있다⁽²¹⁾

4. 실험결과 및 고찰

컵드로잉실험과 U-굽힘실험에서 신뢰성있는 마찰계수를 구하기 위해서는 Eq.(6)에서 비례상수 α 에 대한 적절한 값을 택하는 것이 중요하다. 마찰계수는 비례상수 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 마찰실험결과⁽¹³⁾를 고려하여 α 값을 1.5로 택하였다. 각 실험은 평가하려는 판재에 세척유점 단기방청유 역할을 하는 저점도(2.2cSt/40°C) 윤활유를 균일하게 미량 도포한후 실시하였다.

Fig.5는 컵드로잉실험에서 구한 블랭크가압력과 최대펀치력의 관계를 나타낸다. 각 시편에서 블랭크가압력의 증가에 따라 최대펀치력이 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 실험데이터를 회귀직선식으로 표시하여 직선의 기울기, 즉 최대펀

치력변화/블랭크가압력변화, $\Delta T/\Delta N$, 를 구하여 Eq.(7)에 대입하고 비례상수값 α 를 1.5로 하면 컵드로잉실험에서 마찰계수(μ_{DR})가 얻어진다.

이 결과로부터 Zn-Ni 도금강판은 냉연강판 및 유기피복강판과 비교하여 상당히 큰 마찰계수를 갖고 있음을 알 수 있는데 이는 Zn-Ni 도금강판을 포함하여 자동차 차체의 내식성향상을 위해 널리 사용되고 있는 Zn계 도금강판의 특유의 마찰특성이 반영된 것으로 생각된다. 즉 Zn계 도금강판은 컵드로잉공정에서와 같이 다이폭률반경부에서 인장-굽힘변형시에 작용하는 다이폭률반경부의 압력이 과다해지면 다이폭률반경부에서 도금층이 눌러 윤활막이 존재하지 못하게 되어 도금층이 다이폭률반경부에 늘어붙어 마찰저항을 크게하기 때문으로 생각된다. 이러한 고찰은 Zn-Ni 도금강판의 경우에 컵드로잉실험후 컵의 외벽을 관찰하면 스크래치 형태의 선상흠이 벽을 따라 발생한 것으로 뒤바침할 수 있다.

Table 3은 블랭크가압력을 변경시켜 U-굽힘실험하여 구한 마찰계수(μ_{DR})의 평균값을 나타낸다. 냉연강판은 Zn-Ni 도금강판과 거의 동등한 수준의 마찰계수를 갖는 반면 유기피복강판의 경우는 이들보다 낮은 마찰계수를 갖아 마찰특성이 크게 개선되고 있음을 알 수 있다.

Table 4는 드로오비드 마찰실험에서 구한 마찰계수(μ_{DR})와 컵드로잉실험 및 U-굽힘실험에서 각각 구한 마찰계수들의 비교를 나타낸다. 드로오비드 마찰실험은 저점도윤활유를 도포한 상태와 윤활유를 아세톤으로 깨끗이 닦아낸 후 건조상태에 대해 실시하였다. 드로오비드 마찰실험에서 윤활유를 도포한 상태와 건조상태에 대해 구한 마찰계수를 각각 컵드로잉실험 및 U-굽힘실험결과와 비교하면 윤활유를 도포한 드로오비드 마찰실험의 경우는 U-굽힘실험결과와 잘 일치하고 있고, 또한 건조상태의 드로오비드 마찰실험의 경우는 컵드로잉실험결과와 잘 일치하는 특징을 보인다.

본 연구에서 사용한 3종류의 마찰특성 평가방법은 전체적으로 Zn-Ni 도금강판을 제외하고는 실험방법의 차이에 관계없이 판재의 마찰특성 우열평가가 가능한 것을 알 수 있다. 그러나 Zn-Ni 도금강판의 경우는 마찰실험방법과 표면준비상태에 따라 마찰계수가 크게 변하고 있어서 Zn-Ni 도금강판과 같은 Zn계 도금강판의 마찰특성에 대한 정확한 평가를 위해서는 도금강판이 실제 사용되는 프레스 가공조건을 잘 재현한 마찰실험방법으로 평가하는 것이 바람직하다.

5. 결 론

본 연구에서는 여러 변형모드하에서 판재의 마찰특성을 평가비교하였다. 드로잉변형과 굽힘변형하에서 마찰특성을 평가하기 위하여 박판종합시험기를 이용한 컵드로잉실험 및 U-굽힘실험을 실시하였고 이들 실험으로 부터 구해지는 각종 강판의 마찰계수를 드로오비드 마찰실험결과와 비교였다. 컵드로잉실험에서는 드로잉비를 일정하게하고 실험을 행하여 최대편치력변화/블랭크가압력변화를 구하고 비례상수 α 값으로 적절한 값을 택하면 재료의 마찰계수를 도출할 수 있다. 이 방법은 드로잉모드 형태의 깊은 가공을 받는 판재 및 다이폭률반경부에서 높은 접촉압력을 갖는 가공공정에서 판재의 마찰특성평가

에 매우 유익하다. 한편 U-굽힘실험은 접촉압력이 높지않고 단순굽힘등과 같은 평면변형모드에 가까운 가공공정에서의 마찰특성 평가에 활용가능하다. 한편 도금강판의 경우는 마찰평가 시험방법에 따라 마찰특성의 차이가 크므로 실제 프레스 가공조건을 잘 묘사하는 마찰실험방법을 선택하여야 한다.

후 기

본 연구의 수행에 있어서 시편을 제공하여 준 포항제철 품관부 담당자와 실험을 수행하여 주신 김정철, 손원근씨께 감사드립니다.

6. 참고문헌

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 Mechanic of Sheet Metal Forming: Behaviour and Analysis, D.P.Koistinen and N.-W.Wang (ed.), Plenum Press, New York, 1978, pp.157-177.
3. J.A.Schey' "Tribology in metal working: friction, lubrication and wear" American Society for Metals, Metal Park, OH, 1983.
4. ASTM standard, "Standard practice for evaluating sheet metal forming lubricant", ASTM standard D4173, 1982.
5. K.Hashimoto, T.Ohwue and M.Takita, "Effect of temperature, die materials and lubricant on sliding behaviour of various coated steel sheets", Proc. of 16th IDDRG Biennial Cong., Borlange, Spain, 1990, pp.153-160.
6. 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, WG3/5/81, 1981.
7. 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.
8. H.D.Nine, "The applicability of Coulomb friction to draw beads in sheet metal forming", J. of Applied Metalworking, Vol.2, No.3, 1982, pp.200-210.
9. H.D.Nine, "Friction measurement for forming of zinc-based coated steel sheet" in Zinc-Based Steel Coating System : Metallurgy and Performance, G.Krauss and D.K.Matlock (ed.), 1990, pp.233-242.
10. 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, 1993, pp.187-197.
11. Youngsuk Kim and Wonjib Choi, "New evaluation method for frictional

- characteristics of zinc coated steel sheets", Proc. of 17th IDDRG Biennial Cong., Shenyang, China, 1992, pp.368-375.
12. 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.
13. 김영석, 남재복, 최원집, "자동차용 표면처리강판의 마찰특성에 관한연구", 대한기계학회논문집, Vol.14, No.6, 1990, pp.1474-1486.
14. 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.
15. 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, 1990, pp.189-196.
16. 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, 1987, pp.193-198.
17. S.Y.Chung and H.W.Swift, "Cup drawing from flat blank", Proc. Inst.Mech.Eng. (London), Vol.65, 1951, pp.1990-223.
18. 김영석, 최원집, "컵드로잉에 의한 판재의 마찰특성평가", 자동차공학회 논문집 (인쇄중), 1994년 1월호.
19. N.Iwata, N.Matsui and M.Gotoh, "An elastic-plastic analysis of square cup drawing process", Vol.33, No.381, 1992, pp.1202-1207.
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, 1985, pp.107-120.
21. 김영석, 김정철, "고속 드로오비드 마찰시험기의 개발", 산업과학기술 미공개 내부자료, 1992.

Table 1 Each force component for two friction tests

Components	Cup drawing test	U-bending test
$T_{fd} + T_{rd}$	$A_o K_m \ln(\beta)$	-
$T_b (=T_{ub})$	$A_o \sigma_b (=A_o K_m t_o / 4R_m)$	$2A_o \sigma_b$
T_{ff}	$2\mu_f N / \beta$	$2\mu_f N$
T_{rf}	$\{\exp(\mu_r \phi) - 1\} \times (T_{fd} + T_{rd} + T_b + T_{ff})$	$\{\exp(\mu_r \phi) - 1\} \times (T_{fd} + T_{rd} + T_b + T_{ff})$

- * β : drawing ratio ($=D_o/D_i$), N : blank holding force
- A_o : cross section area, σ_b : bending stress, K_m : mean flow stress
- t_o : specimen thickness, R_m : radius of die curvature
- μ_f : coefficient of friction at flange
- μ_r : coefficient of friction at radius of die curvature
- ϕ : contact angle at radius of die curvature (assumed as $\pi/2$)

Table 2 Mechanical properties of the tested specimens

Material	t (mm)	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	R 15%	n 10-20%
CR	0.70	169	285	46.8	1.81	0.22
Zn-Ni	0.65	184	300	45.1	1.76	0.22
Organic	0.65	177	296	44.6	1.54	0.21

- * Tensile specimen : ASTM E-8 standard, t : thickness
(1 kg/mm² = 9.8MPa, 1 ton = 9.964kN)

Table 3 Friction coefficients of sheet materials calculated from the U-bending tests

Material	BHF, N(kN)	Drawing force T(kN)/T [*] (kN)	μ_{UBT}
CR	19.93	16.44	0.152
	21.92	17.04	0.149
	29.89	21.42 / 8.17	0.160
	34.87	23.31	0.158
	39.95	25.31	0.156
Mean			0.155
Zn-Ni	21.72	17.04	0.153
	24.91	17.73	0.146
	29.89	18.43 / 7.97	0.133
	32.88	20.23	0.140
Mean			0.143
Organic	21.02	13.65	0.104
	24.91	14.55	0.103
	29.89	16.44 / 8.17	0.109
	35.07	18.33	0.114
	39.85	20.33	0.119
Mean			0.109

Table 4 Comparison of friction coefficients of sheet materials in different friction tests

Material	μ_{DBT} (Lub./Dry)	μ_{CBT}	μ_{UBT}
CR	0.162/0.151	0.154	0.155
Zn-Ni	0.139/0.282	0.322	0.143
Organic	0.124/0.137	0.122	0.109

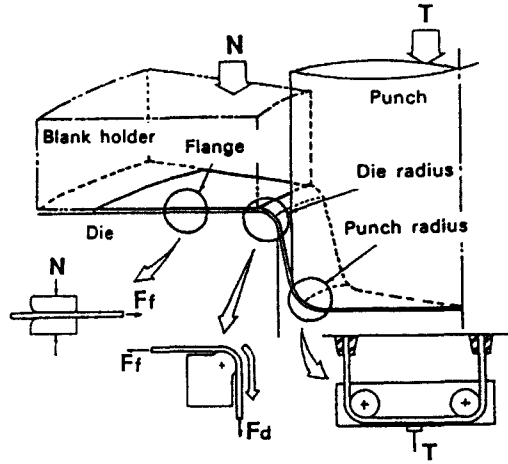


Fig.1 Friction state at each part in cup drawing process

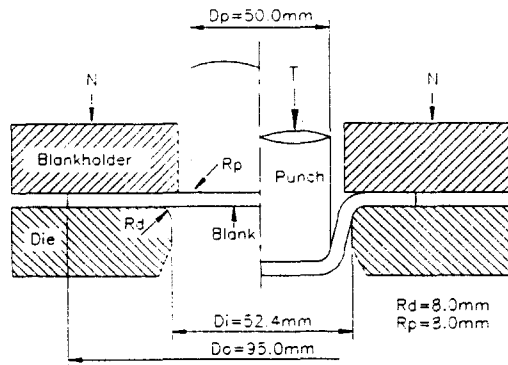


Fig.2 Cup drawing test

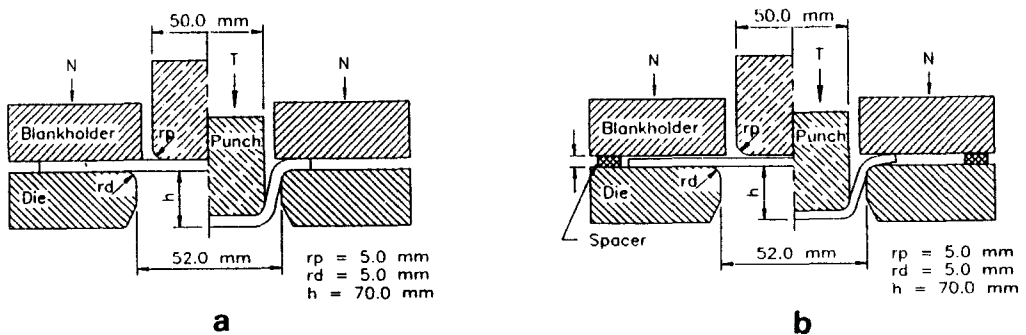


Fig.3 U-bending test (a) under constant blank holding force and (b) under constant die gap

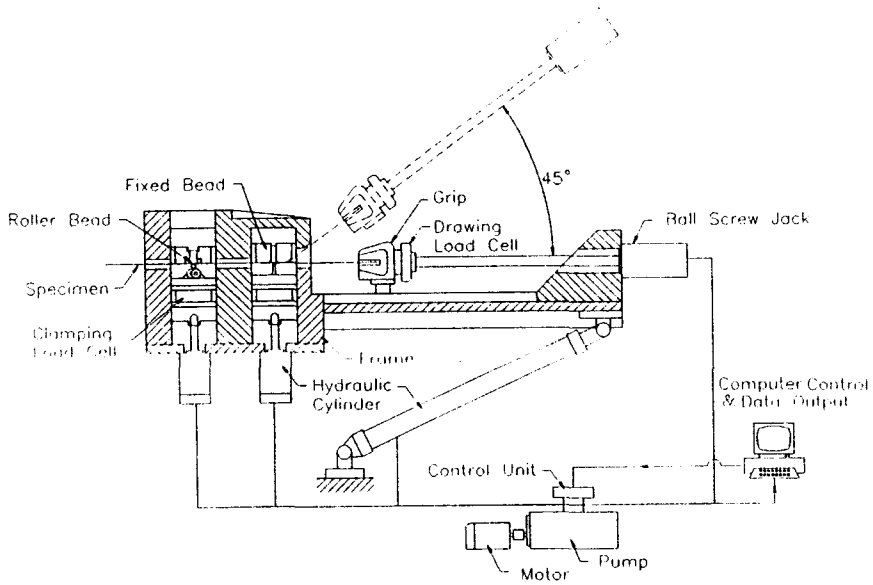


Fig. 4 Schematic view of draw bead friction tester

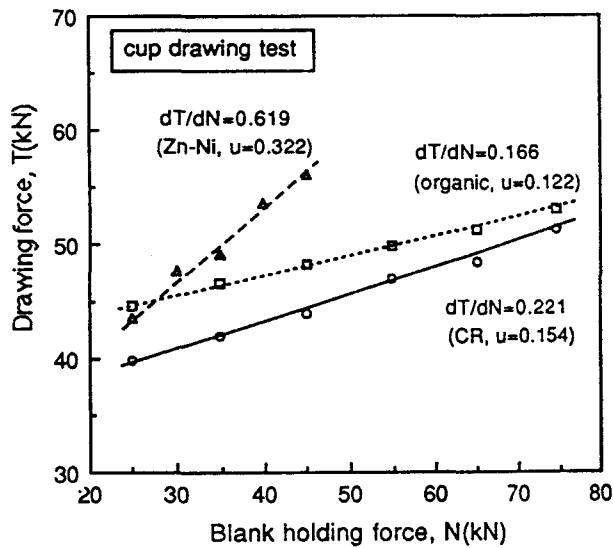


Fig. 5 Punch force versus blank holding force curve for cup drawing test