

피복된 판재의 성형에서 마찰특성에 관한 연구

김호윤*, 최철현*, 배원병**

An Experimental Study on Friction Characteristics in Pre-Coated Sheet Metal Forming

Ho-Yoon Kim*, Cheol-Hyun Choi*, Won-Byong Bae**

ABSTRACT

An experimental study has been performed to investigate friction characteristics of pre-coated metals widely used in domestic appliances. Seven-coated sheet metals are tested by using three friction mechanism such as straight pulling, frictionless roller, and non-rotational roller with three kinds of cylindrical rollers. In this experiment, effects of friction mechanism, blank thickness, and roller diameter on friction coefficient, surface roughness, and scoring factor have been investigated

From the experimental results, it has been found that tested pre-coated sheet metals have low friction coefficients ($\mu = 0.15 \sim 0.20$) because films coated on sheets take a role of lubricants. Friction coefficients of pre-coated metals decrease with increasing roller-diameters. Surface of pre-coated metals can be improved by decreasing the blank thickness

Key Words : Pre-Coated Metal(피복된 판재), Friction Characteristics(마찰특성), Friction Coefficient(마찰계수)

1. 서론

공학이 점차 발달함으로 인하여 제품의 생산 결과로 인한 환경오염에 대한 우려가 커지고 있는 가운데, 환경대응소재의 활용정도가 점차 확대되고 있다. 특히 환경대응소재로 잘 알려진 PCM (Pre-Coated Metal)의 사용이 급격하게 증가하고 있다.

PCM 재란 일반적으로 모재에 도장 혹은 필름을 덧 입힌 금속판을 말한다^[1]. 주로 아연도금강판이 모재로 많이 사용되다가, 스테인리스나 알루미늄 판으로 사용이 확대되었다. 그러나 PCM 재를

이용한 성형가공에 대한 큰 기대에도 불구하고, 현재는 경험과 데이터를 축적하고 있는 상태이다^[2].

이러한 PCM의 성형에 있어서 주로 문제되는 부분은 도장피막의 박리이며^[3], 이에 관한 연구도 해외에서 일부 수행되었다. 그러나 이전의 연구는 금형과 도장피막 사이에서 발생하는 가공열에 의해 도장막이 파괴되는 현상에 관한 연구에 치우쳐 있었기 때문에, 마찰특성, 박리, 또는 표면균함에 관한 연구가 많이 부족한 실정이다.

또한, PCM 재는 금형과 접촉하는 부분이 도장막일 경우가 많고, 대부분의 경우 도장막의 인장

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
** 부산대학교 공과대학 기계공학부/기계기술연구소

강도, 연신율 등의 물성치가 모재의 물성치보다 낮다^[3]. 그러므로 PCM 재를 사용한 공정에서는 모재의 특성보다 도장막의 특성에 의존하기 때문에 도장막의 마찰특성에 대한 새로운 연구가 수행되어야 한다. 그러나 현재 국내에는 PCM 재의 마찰특성에 대한 정성적 또는 정량적인 데이터가 없는 관계로, 대부분의 PCM 재를 사용한 공정에서 평가기준 없이 시행착오를 통하여 사용되고 있다. 따라서 이러한 시행착오에 많은 시간과 노력 등의 손실이 발생하고 있고, 이러한 손실을 최소화하기 위하여 PCM 재의 마찰특성에 대한 연구가 더욱 필요하다.

본 논문에서는 마찰장치의 종류와 소재의 종류, 그리고 실험에 사용되는 롤러직경에 따른 가진제품 용 PCM 재의 마찰효과를 실험을 통하여 살펴보고, 그 결과를 마찰계수, 표면조도, 그리고 SF(Scoring Factor)로 표시하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험소재

본 연구에 사용된 소재는 현재 가진제품 용으로 사용되고 있는 7종의 폴리에스테르계 수지도포한 PCM 재로서, 각 PCM 재의 종류와 인장시험에 의한 물성치는 Table 1에 표시하였다.

Table 1 Sheet metals used in the experiment

Material	t (mm)	SR (μm)	σ_y	elongation
Mat. A	0.78	0.68	23.49	22.16
Mat. B	0.77	1.06	19.21	24.69
Mat. C	0.75	1.63	37.08	19.56
Mat. D	0.53	-	22.87	18.55
Mat. E	0.50	0.28	22.38	24.75
Mat. F	0.53	0.41	26.35	20.20
Mat. G	0.53	0.41	23.60	19.20

* t : Thickness of a sheet metal

SR : Initial surface roughness of a sheet metal(R_{max})

σ_y : Yield stress of a sheet metal

*^④ Mat. D has embossed surfaces

2.2 실험장치 및 조건

마찰시험에 사용된 장비는 10ton MTS(Material

Testing System)이며, 마찰시험에서 마찰기구와 롤러직경에 따른 마찰계수의 변화를 파악하였다. 구체적인 마찰시험조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Conditions for friction tests

Friction Mechanism	Type A(Straight Pulling) Type B(Bent Pulling with RR) Type C(Bent Pulling with NRR)
Roller Diameter	16, 32, 64mm
Contact Area	44mm × 52mm
Pulling Velocity	120mm/min
Pulling Length	150mm
Specimen Size	52mm × 457mm
Holding Force	355kgf
Lubricant	None

* RR : Rotational Roller

NRR : Non-Rotational Roller

위에서 제시한 조건에 따라 마찰시험을 수행하고, 그 결과인 하중-변위 선도로부터 얻은 데이터로 마찰계수를 계산한다.

2.3 마찰시험 및 평가

판재의 마찰특성을 평가하는 방법은 여러 가지가 개발·제안^[4~10]되었다. 그런데 판재성형공정에서 대부분의 작업은 다이 어깨부(die shoulder)에서 굽힘이 일어나고, 플랜지부에서 블랭크 홀더가 작동하는 방식이므로, 두 부분에서의 마찰영향을 알아낼 수 있는 방법^[10]을 선정하였다. 세 종류의 마찰실험장치의 개략도는 Fig. 1에 제시하였다.

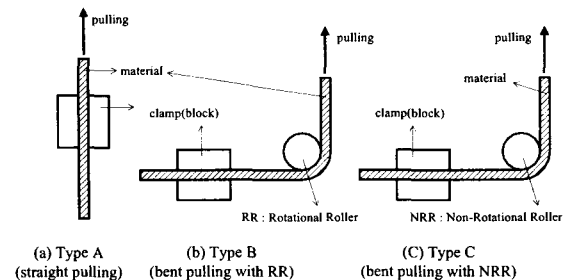


Fig. 1 Schematic diagram of three-type mechanisms for friction tests

일반적으로 마찰시험의 결과를 평가하는 기준은 마찰계수를 기준으로 하는 것과 시험 후 표면 상태를 기준으로 하는 두 가지로 나눈다. 시험 후의 표면상태의 변화는 직접 표면조도를 측정하는 방법과 하중-변위 선도에서 SF를 계산하여 평가하는 두 가지 방법이 있다. 여기서는 마찰계수와 시험 후 표면상태(표면조도, SF)의 변화를 모두 살펴보았다. 다음은 각 방법에 대한 설명이다.

2.3.1 마찰계수

(1) 블랭크 홀더부에서의 마찰계수

실험결과 나타난 하중-변위선도에서 정상상태를 유지하는 구간을 TMS(Test Measurement Segment)라 한다. Fig. 1의 Type A에 의한 실험에서 TMS 내의 순간하중을 P 라 하면, TMS에서의 평균마찰계수 $\mu_{1,av}$ 는 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_{1,av} = \frac{\sum_{n=1}^K \frac{P_n}{2F_c}}{K} \quad (1)$$

여기서, F_c 는 홀드력(clamping force), K 는 데이터의 총 개수이다.

(2) 금형의 곡률부에서의 마찰계수

Fig. 1의 Type B, C에서 굽혀진 부분에 대한 자유물체도는 Fig. 2와 같다.

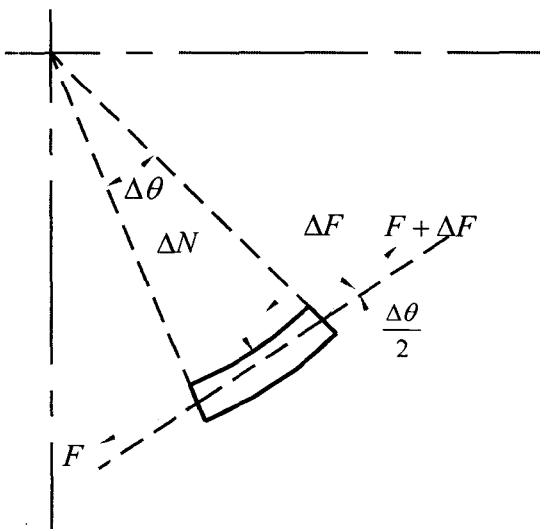


Fig. 2 Free body diagram of the bent sheet

여기서, 마찰을 극복하기 위한 힘을 ΔF , 물리에 작용하는 수직하중을 ΔN 이라고 하면 마찰계수 μ_2 는 식 (2)와 같다.

$$\mu_2 = \frac{\Delta F}{\Delta N} \quad (2)$$

여기서, $\Delta\theta$ 는 충분히 작으므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 따라서 식 (4)가 성립한다.

$$\Delta N = 2F \sin \frac{\Delta\theta}{2} = F\Delta\theta \quad (3)$$

$$\frac{dF}{F} = \mu_2 d\theta \quad (4)$$

이 식은 식 (5)와 같이 확장된다.

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \mu_2 d\theta = \int_{2F_c\mu_1}^{P-B} \frac{dF}{F} \quad (5)$$

여기서, 좌변은 순수한 소재와 롤러사이에서 발생하는 평균마찰계수이고, $P-B$ 는 순간인장하중(P)에서 다이 어깨부에서 발생하는 소재의 굽힘에 필요한 하중(B)을 제외한 하중, $2F_c\mu_1$ 은 홀더에서 발생하는 하중을 의미한다.

그런데, 이 실험에서 발생하는 하중은 홀더에서 발생하는 하중과, 소재가 굽혀질 때 발생하는 하중, 그리고 소재와 롤러사이의 마찰에 의한 하중의 세 가지로 구성되므로, 소재와 롤러사이의 마찰에 의해 발생된 하중만으로 마찰계수를 구한다면, 금형의 곡률부에서 발생하는 마찰계수를 정확히 계산할 수 있다. 따라서, 롤러부분의 평균마찰계수(μ_2)는 식 (6)과 같다.

$$\mu_2 = \frac{2}{\pi} \ln \frac{P-B}{2F_c\mu_1} \quad (6)$$

여기서, $P-B$ 를 P 로 대체하면, 정확한 마찰계수의 값이 아니나, 굽힘의 영향이 어느 정도 고려된 마찰계수를 구할 수 있다.

2.3.2 표면조도 측정

조도측정기를 이용하여 시험 전의 표면조도와

시험 후의 표면조도를 측정하여, 제품성형공정에서 표면상태가 얼마나 악화되는지 판정하는 방법이다.

2.3.3 Scoring Factor

SF는 마찰에 의해 접촉면의 품질의 향상 또는 악화를 판정할 수 있는 하나의 기준으로 식 (7)과 같이 정의된다.

$$SF = \frac{P}{P_{init}} \quad (7)$$

여기서, P 는 TMS에서의 평균하중이고, P_{init} 는 TMS에서의 초기하중이다.

생산현장에서 일반적으로 $0.9 < SF < 1.2$ 인 경우에는 접촉면에 특별한 변화가 없다고 생각한다. 따라서 제품의 성형에서의 SF는 $SF < 1.2$ 를 만족하여야 제품의 품질향상을 기대할 수 있다.

본 논문에서는 제시된 공식을 식 (8)과 같이 일반화하여 사용하였다.

$$SF_{ave} = \frac{\sum_{n=1}^K \frac{P_n}{P_{init}}}{K} \quad (8)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰계수

Fig. 1에서 제시한 세 가지 마찰실험장치를 사용하여 실험한 결과, 측정된 하중과 마찰계수는 Table 3과 같다.

Table 3에서 보면 Type A(직선인장 마찰시험)에서 나타난 마찰계수는 평평한 다이와 소재사이의 마찰계수를 나타내고, Type C(굽힘인장 마찰시험)에서 나타난 마찰계수는 다이 어깨부와 소재사이의 마찰계수를 나타낸다. Type A에서는 대체적으로 0.15 전후로 균일하게 나타나지만, Type C에서는 두꺼운 Mat. A, B, C의 마찰계수가 얇은 Mat. D, E, F, G의 마찰계수보다 크게 나타났다. 이것은 마찰계수를 구하는 공식에 소재의 두께를 고려하는 항이 없기 때문에 두께가 두꺼울수록 롤러에서의 굽힘력이 크게 되고, 따라서 전체하중이 증가하게 되므로 동일한 조건에서 마찰계수가 더 크게 나타난다.

또한, Mat. A의 경우 고정롤러를 가진 굽힘인장 마찰시험(Type C)에서 롤러의 직경을 16, 32, 64mm로 증가시키면, 롤러의 직경이 클수록 마찰계수의 값이 작게 나타나는데, 이것은 두 가지 이유 때문으로 보인다. 첫째는 롤러의 직경이 작을수록 마찰이 발생하는 접촉면에 큰 압축응력이 발생하고, 이 압축응력으로 인하여 도장막이 손상되기 때문이다. 둘째는 롤러(다이 어깨부)에서 마찰에 의한 하중증가보다는 굽힘에 의한 하중증가가 크기 때문이다.

Table 3 Average load and friction coefficient in various experimental conditions

Material	Type A		Type C (d=16mm)		Type C (d=32mm)		Type C (d=64mm)	
	Load	F.C.	Load	F.C.	Load	F.C.	Load	F.C.
Mat. A	65.90	0.19	123.34	0.40	83.20	0.15	73.06	0.07
Mat. B	48.70	0.14	108.75	0.51	65.06	0.18	-	-
Mat. C	55.52	0.16	103.75	0.40	69.26	0.14	-	-
Mat. D	50.99	0.14	85.66	0.33	69.84	0.20	-	-
Mat. E	56.05	0.16	102.44	0.38	67.83	0.12	-	-
Mat. F	52.88	0.15	77.52	0.24	57.22	0.05	-	-
Mat. G	54.65	0.15	80.32	0.25	59.01	0.05	-	-

* Load(kgf) : Average Load in Test Measurement Segment
F.C. : Friction Coefficient in Test Measurement Segment

Table 4 Surface roughness and scoring factor in various experimental conditions

Material	Type A		Type B (d=16mm)		Type B (d=64mm)		Type C (d=16mm)		Type C (d=32mm)		Type C (d=64mm)	
	SR	SF	SR	SF	SR	SF	SR	SF	SR	SF	SR	SF
Mat. A	0.95	0.99	1.00	1.00	0.78	1.00	1.10	1.00	0.89	1.02	1.15	1.03
Mat. B	1.09	0.90	1.09	1.00	1.08	1.00	1.27	1.04	1.08	0.95	-	-
Mat. C	1.73	1.03	1.77	1.03	1.65	0.97	1.79	1.02	1.77	1.01	-	-
Mat. D	-	0.95	-	1.05	-	1.04	-	1.06	-	1.04	-	-
Mat. E	0.49	1.04	0.55	1.01	0.37	1.04	0.59	0.99	0.42	1.02	-	-
Mat. F	0.49	0.98	0.53	0.99	0.51	0.98	0.57	1.07	0.51	1.01	-	-
Mat. G	0.95	1.01	1.07	1.00	0.75	1.09	1.23	1.04	0.82	1.09	-	-

* SR : Surface Roughness(R_{max} , μm)

SF : Scoring Factor

** Mat. D has embossed surfaces

3.2. 표면조도

성형 후 소재의 표면조도를 Table 4 에 나타내었다. TMS 에서의 표면조도를 측정하기 위하여, 소재가 마찰이 일어나기 시작하는 지점으로부터 20 ~ 50mm 후의 위치에서 R_{max} 값을 측정하였다. 측정에 사용된 장비는 SJ201 (Mitutoyo 社, 측정길이 8mm)이다. 또한 표면조도와 관련이 있는 SF 값과 비교를 하였다.

여기서, Mat. D의 경우에는 소재의 표면에 요철이 있기 때문에, 표면조도를 평가할 수 없으므로 표면조도에 관한 논의에서는 제외하였다.

Table 4 에서 보이듯이 소재의 두께가 두꺼우면 표면조도가 나빠진다. 이것은 두께가 두꺼울수록 소재의 표면에서 압축응력이 크게 발생하기 때문이다. 롤러의 직경이 16mm인 경우에 마찰기구에 따른 표면조도의 변화를 살펴보면, Type B의 경우보다 Type C의 경우에 표면조도가 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이것은 Type B의 회전롤러는 거의 마찰이 없는 상태이나, Type C는 고정롤러이어서 마찰이 크기 때문이다. 그리고, Type C(굽힘인장 마찰시험)에서 롤러의 직경에 따른 표면조도의 변화를 살펴보면, 롤러의 직경이 클수록 대체로 표면조도는 감소한다. 이것은 이전에 논의된 롤러의 직경이 클수록 마찰계수가 작았던 것과 같은 이유이다.

3.3 Scoring Factor

각 실험에 대한 SF 값은 Table 4 와 같이 0.90 ~ 1.09 사이로 나타났다. 즉, 성형 중에는 표면조도의 변화가 심하지 않다는 것을 나타내며, 제작된 금형은 주어진 소재를 성형할 때, 모재의 표면에 나타나는 결함이 없다는 것을 뜻한다. 또한 실험한 제품의 표면에도 결함은 없었다.

4. 결론

PCM 재의 성형에서 마찰특성을 규명하기 위하여 세 종류의 마찰실험장치를 사용하여 실험하고 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PCM 재의 폴리에스테르계 도장피막은 윤활제의 역할을 하게되고, 그 때의 마찰계수는 0.15 ~ 0.20 이다.
- 2) PCM 재의 성형공정에서 다이 어깨부의 곡률반경을 증가시키면 마찰계수가 증가하고, 표면상태가 좋아진다.
- 3) 굽힘인장 마찰시험의 경우, 소재의 두께가 두꺼울수록 표면상태가 더 나빠진다.

참고문헌

1. 町田輝史, “프리카트 메탈 현황,” 프레스기술, No. 12, pp. 16~26, 1995.

2. 김호윤, 왕신일, 배원병, “프리코트 메탈의 성형 한계에 관한 연구,” 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 159~162, 1999.
3. T. Kato, “Press Formability on Sheet Metals with Surface Treating,” Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. 38, pp. 35-39, 1997.
4. M. Jonasson, A. Wihlborg, L. Gunnarsson, "Analysis of surface topography changes in steel sheet strips during bending under tension friction test," Int. J. Mach. Tools Manu., Vol. 38, No. 5-6, pp. 459~467, 1998.
5. Y. Kong, Y. Sun, W. Wang, "Development of a new friction test device in sheet forming," Proc. 5th Int. Conf. Tech. Plas., Vol. 2, pp. 835~838, 1996.
6. B. Pugh, Friction and Wear, Newnes-Butter Worths, pp. 173~197.
7. J. A. Schey, Tribology in Metalworking, ASM, pp. 197~225.
8. 종이 및 판지의 마찰계수 시험방법, KS 규격집, KS-7134.
9. Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting, ASTM, D-1984.
10. W. J. Wojtowicz, "Lubrication characteristics of drawing compound," SME Creative Mfg Semi., MF70-502.