

초고강도강판 마찰특성의 실험적 규명

김남진¹ · 김영탁[#]

Experimental Determination of Friction Characteristics for Advanced High Strength Steel Sheets

N. J. Kim, Y. T. Keum

(Received May 28, 2013 / Revised June 17, 2013 / Accepted June 25, 2013)

Abstract

The friction coefficients of advanced high strength steel sheets were experimentally determined. In the friction test, the pulling and holding forces acting on the sheet for various friction conditions, such as lubricant viscosity, pulling speed, blank holding pressure, sheet surface roughness, and hardness of the sheet were measured and the friction coefficient was calculated based on Coulomb's friction law. While the friction coefficient, generally, decreases as the value of friction factor increases, the factor associated with the sheet surface roughness shows U shape behavior for the friction coefficient. Furthermore, the relationship between friction coefficient and the wear volume, which was computed for the roughness of both sheet surfaces and the friction area, is linearly proportional.

Key Words : Friction Coefficient, Blank Holding Pressure(BHP), Drawing Speed, Lubricant Viscosity, Sheet Surface Hardness, Sheet Surface Roughness, Wear Volume, Advanced High Strength Steel Sheet(AHSS)

1. 서론

마찰은 많은 마찰 인자들이 복합적으로 작용하여 일어난다. 이 때문에 마찰계수의 값을 단순히 1~2 마찰인자만을 변화시킨 실험으로 구하면 정도 높게 구하기 어렵다. 따라서 다양한 마찰인자들을 고려한 마찰실험을 수행하고, 마찰인자들에 따른 마찰특성을 데이터베이스화하면, 고정도 박판 성형용 마찰모델의 구성이 가능하다. 이를 위해 먼저 다양한 마찰인자들에서 마찰실험이 수행되고 마찰특성이 규명이 되어야 한다.

마찰에 관한 연구는 비교적 간단한 실험을 통해 정성적으로 연구되어 왔다. Lanzon 등[1]은 윤활조건, 표면처리와 접촉압력 증가에 따른 마찰계수를 관찰하여 윤활상태에서의 접촉압력 증가가

마찰을 감소시킨다는 것을 관찰하였다. Kotchman 등[2]은 박판의 인출속도에 따른 마찰계수의 변화를 관찰하였다. Zhang 등[3]은 블랭크 홀더에 프로브를 장착한 실험장치를 고안하고 이를 이용하여 판재와 금형 사이의 마찰계수를 측정하였다. Wang 등[4]은 박판 성형시의 마찰 거동과 박판 및 공구의 경도가 마찰계수에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 하여 박판과 공구의 표면경도가 증가할수록 마찰계수가 감소한다는 것을 관찰하였다. Kim 등[5]과 Han[6]은 자동차용 강판의 마찰특성을 관찰하였다. Kim 등[7]은 동일한 롤러반경을 가진 조건에서 굽힘력이 증가할수록 마찰계수가 감소하는 것을 관찰하였다. Wihlborg 등[8]은 표면 조도에 따른 마찰거동이 U자형상을 갖는다는 것을 관찰하였다.

1. 한양대학교 일반대학원, 자동차공학과
Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Hanyang University, ytkeum@hanyang.ac.kr

본 연구에서는 초고강도강판(780DP, 780TR, 980DP, 1180CP)을 대상으로 마찰인자들 즉, 윤활유 점도, 인출속도, BHP, 표면조도, 경도에 따른 마찰 특성을 마찰실험으로 측정하고, 고강도강판의 마찰특성과 마찰인자들 간의 관계를 정립한다.

2. 마찰 실험

2.1 실험조건

마찰실험은 좌측에 다이 조립체, 중앙에 시편을 고정하는 그림, 우측에 다이와 그림에 의해 고정된 시편을 당겨주는 모터로 구성된 평마찰측정장치[9]로 수행되었다. 마찰실험에 사용된 시편은 폭 20mm, 길이 600mm로 절단하여 사용하였고, 전단과정 중 생기는 버(burr)는 완전히 제거하였으며, 많이 휘어지거나 표면이 긁힌 시편은 사용하지 않았다.

마찰 실험조건은 Table 1과 같이 4가지 종류의 초고강도강판에 대해 무윤활을 포함한 3가지 종류의 윤활유 점도, 5가지 종류의 인출속도, 4가지 종류의 블랭크 가압력(blank holding pressure, BHP)을 실험변수로 정하고 마찰 실험을 수행하였다.

마찰인자들에 따른 마찰계수들은 마찰시험기의 로드셀에서 얻은 블랭크 홀딩 가압력과 인출 마찰력을 사용하여 Coulomb 마찰법칙에 기초한 식 (1)로부터 구해진다.

$$\mu_{ave} = \frac{\sum_{k=1}^K \left(\frac{F}{P} \right)_k}{K} \quad (1)$$

여기서 μ_{ave} 는 평균 동 마찰계수, P는 수직 가압력(BHP), F는 인출마찰력, K는 총 측정횟수를 나타낸다.

Table 1 Friction test conditions

Material Grade	Lubricant Viscosity (cSt)	B H P (MPa)	Drawing Speed (mm/min)	Sheet Roughness (μm)	Sheet Hardness (Hv)
780DP	Dry	1.11	300	0.722	190
780TR	30 (Low Drawing Oil)	1.67	600	0.651	215
			900		
980DP	127	2.22	1200	0.91	255
1180CP	127 (High Drawing Oil)	2.78	1500	0.973	325

2.2 실험 결과 및 고찰

2.2.1 윤활유 점도의 영향

마찰 실험을 통해 구한 780DP강판과 1180CP 강판의 마찰계수 값을 3가지 윤활유 점도 조건에서 인출속도의 변화에 따라 정리하면 각각 Fig. 1과 Fig. 2와 같다. 윤활유 점도가 증가할수록 마찰계수가 감소한다. 이는 저 점도유가 고 점도유보다 쉽게 유체윤활상태가 파괴되고 마찰표면에 오래 머물 수 없게 되어 마찰계수가 높아지는 반면, 고 점도유는 저 점도유보다 오랜 시간 동안 마찰 표면에서 윤활작용을 하기 때문이다[9].

그러나 1180CP는 윤활유 점도의 영향을 거의 받지 않는다. 이는 박판 표면 경도가 커서 마찰이 거의 발생하지 않아 마찰 중 유체윤활 상태가 쉽게 파괴되고, 윤활유의 공급이 원활하지 않기 때문으로 판단된다.

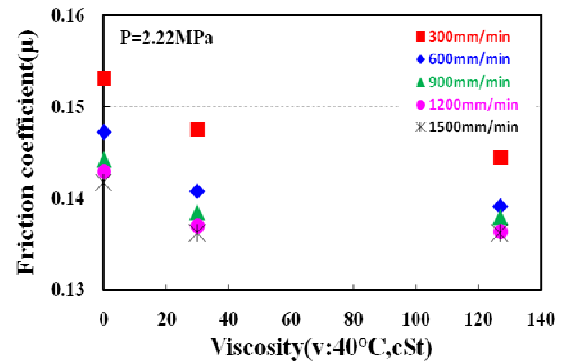


Fig. 1 Friction coefficients of 780DP sheet associated with lubricant viscosities in various drawing speeds

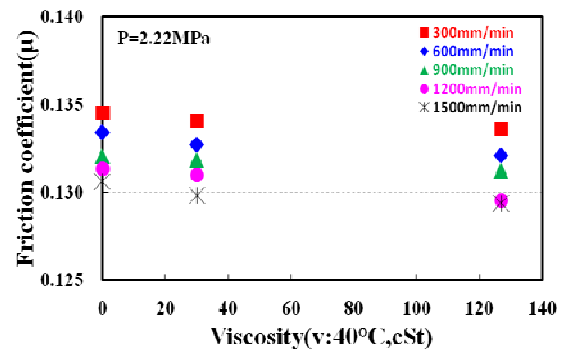


Fig. 2 Friction coefficients of 1180CP sheet associated with lubricant viscosities in various drawing speeds

2.2.2 인출속도의 영향

편치속도가 빠를수록 실제 박판성형공정에서의 시편과 금형 사이의 상대속도도 빨라지게 되므로 실험에서 시편의 인출속도는 실제 성형공정에서의 편치속도와 유사하게 취급될 수 있다.

마찰실험으로부터 구한 780DP강판과 1180CP강판의 마찰계수를 5가지 인출속도 조건에서 BHP의 변화에 따라 나타내면 각각 Fig. 3과 Fig. 4와 같다. 인출속도가 증가할수록 마찰계수는 감소한다. 이는 편치와 박판이 상대운동을 할 때 계면의 골에 형성되어 있는 오일포켓이 파괴되기 때문이다. 즉, 운동속도가 늦어 오일포켓이 파괴되면 윤활유가 손실될 수 있는 시간이 길어지고 이에 따른 경계 윤활이 증가하여 마찰이 커지는 반면, 운동 속도가 빠르면 윤활유가 손실되는 시간이 짧아져 마찰이 작아진다[9].

그러나 1180CP강판은 인출속도의 영향을 매우 적게 받는다. 이것은 표면 마멸량이 매우 적어 인출속도가 증가해도 실제 마찰면적은 거의 변하지 않고, 윤활유 손실속도도 거의 같기 때문이다.

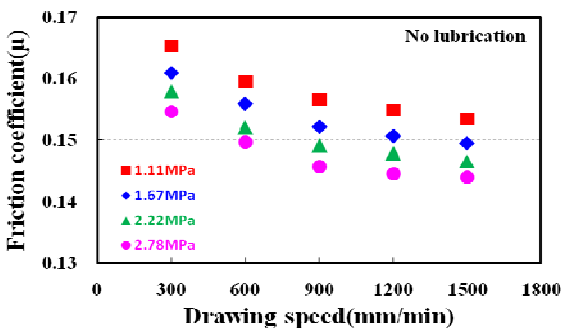


Fig. 3 Friction coefficients of 780DP sheet associated with drawing speeds in various BHPs

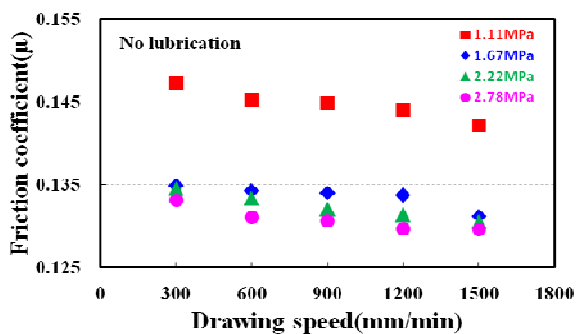


Fig. 4 Friction coefficients of 1180CP sheet associated with drawing speeds in various BHPs

2.2.3 BHP의 영향

마찰실험으로부터 구한 780DP강판과 1180CP강판의 마찰계수 값을 4가지 BHP 조건에서 인출속도의 변화에 따라 나타내면 각각 Fig. 5와 Fig. 6과 같다. BHP가 증가할수록 마찰계수는 대체로 감소한다. 이는 높은 BHP에 의해 시편 표면의 거칠기 층이 파괴되어 다이의 매끈한 표면을 지나게 되어 마찰계수는 작아진다. 그러나 낮은 BHP에서는 시편 표면의 거칠기 층을 효과적으로 파괴하지 못하여 다이를 지나는 시편의 표면이 거칠어지기 때문에 마찰계수가 높아진다[10].

그러나 1180CP강판은 BHP의 영향을 매우 적게 받는다. 이는 박판 표면의 경도가 커서 BHP가 증가하여도 파괴되는 거칠기가 일정하기 때문으로 판단된다. 1.11MPa의 BHP에서 측정된 높은 마찰계수는 Fig. 7의 결과로 설명된다. 즉, 1.67MPa의 BHP에서는 시편 표면이 마멸되어 매끈한 표면이 생기지만, 1.11MPa의 BHP에서는 시편 표면의 거칠기 층을 파괴하지 못해 큰 마찰계수가 측정된다.

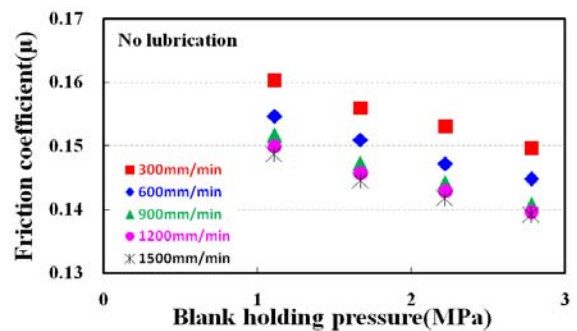


Fig. 5 Friction coefficients of 780DP sheet associated with BHPs in various drawing speeds

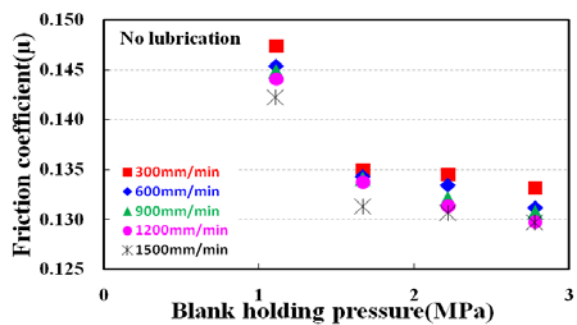


Fig. 6 Friction coefficients of 1180CP sheet associated with BHPs in various drawing speeds

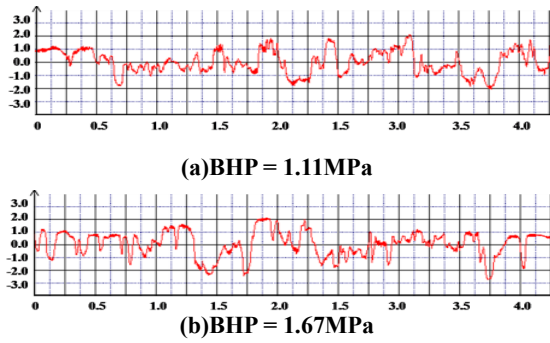


Fig. 7 Surface roughness profiles of 1180CP sheet

2.2.4 경도의 영향

다양한 경도 조건에서 BHP와 인출속도의 변화에 따른 마찰계수를 정리하면 각각 Fig. 8과 Fig. 9와 같다. 일반적으로 경도가 클수록 마찰계수는 작아진다. 이는 경도가 클수록 마찰력으로 인한 마멸이 감소하여 실제 마찰면적이 작아지기 때문이다. 또한 큰 경도조건에서는 실험변수 값이 증가하여도 마멸되는 면적의 차이가 미미하기 때문에 마찰계수 값의 변화도 작아지게 된다.

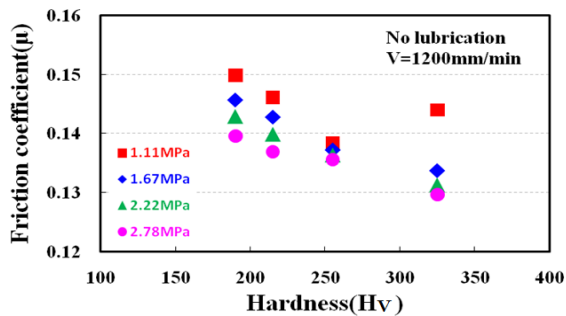


Fig. 8 Friction coefficients associated with sheet hardness in various BHPs

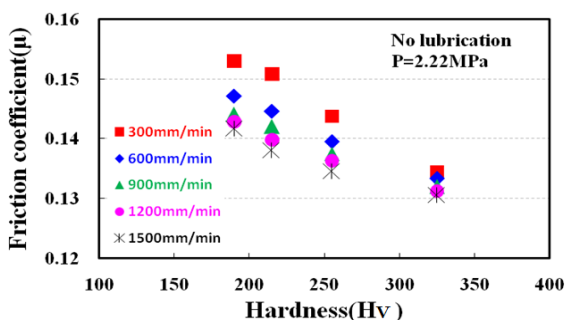


Fig. 9 Friction coefficients associated with sheet hardness in various drawing speeds

2.2.5 박판조도의 영향

다양한 박판 표면조도 조건에서 BHP와 인출속도의 변화에 따른 마찰계수를 나타내면 각각 Fig. 10과 Fig. 11과 같다. 대체적으로 표면조도가 클수록 마찰계수는 증가한다. 이는 표면조도가 클수록 표면돌기의 소성력이 증가하고, 마멸 후 실제 마찰면적이 증가하기 때문이다.

또한 표면조도가 0.7 μm 인 강판을 기준으로 마찰계수의 분포가 U자 형태를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 Wihlborg 등[8]과 Keum 등[11]의 연구에서도 언급된 바 있다.

2.3 표면형상 변화 및 마멸량 산출

마찰이 발생하게 되면 금형보다 경도가 낮은 시편 표면의 거칠기 층이 파괴되기 때문에 매끈한 표면이 생기고, 일정한 마찰이 유지된다. 그러나 거칠기 층의 마멸이 증가하면 실제 마찰면적이 넓어지고, 마멸된 파편에 의한 표면 굽힘 현상이 동반되어 마찰계수가 증가하게 된다.

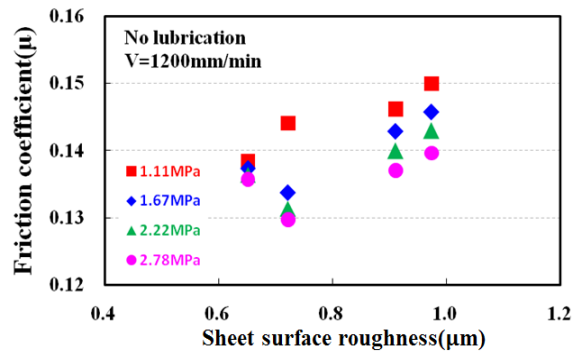


Fig.10 Friction coefficients associated with sheet surface roughness in various BHPs

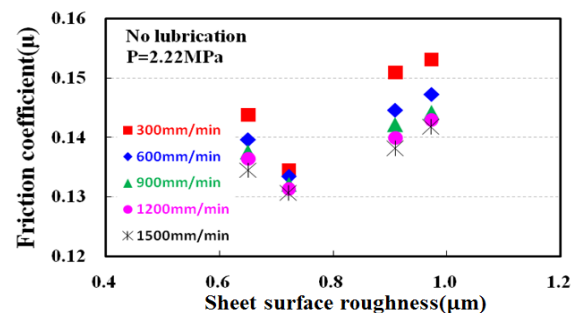


Fig.11 Friction coefficients associated with sheet surface roughness in various drawing speeds

고강도강판에서 이 현상을 관찰하기 위하여 본 연구에서는 표면조도의 변화량과 실제 마찰면적 증가량을 바탕으로 마멸량을 산출하고 마멸량과 마찰계수와의 관계를 알아보았다.

2.3.1 표면 조도의 변화

마찰에 의해 시편 표면 거칠기 층이 파괴되면 표면조도는 Fig. 12의 결과처럼 마찰 전 보다 작아진다. 780DP, 780TR, 980DP강판은 마찰전과 후의 표면조도 차이가 크지만, 1180CP강판은 거의 없다. 이는 상대적으로 높은 경도의 영향으로 마멸이 거의 발생하지 않기 때문으로 판단된다. 또한 다른 강판과 달리 1180CP강판은 윤활의 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다.

2.3.2 실제 마찰면적의 변화

마찰 계면에 응착 및 마멸이 생기면 표면 거칠기 층이 파괴되어 매끈한 마찰 면이 생긴다. 이것의 면적을 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 Fig. 13과 같이 측정하였다. 밝은 부분이 마멸 된 부위이다. 780DP강판은 무윤활일 때의 면적이 훨씬 넓지만, 1180CP강판은 윤활일 때와 무윤활일 때의 면적이 거의 차이가 없다.

Fig. 14는 Image-Pro프로그램을 사용하여 측정된 SEM(Scanning Electron Microscope)사진의 마멸부 면적을 보여주고 있다. 980DP강판의 마멸 부 면적이 780TR강판보다 더 크지만, 표면 거칠기 층의 형태나 산포가 다르기 때문에 문제되지 않는다. 그러나 윤활일 때와 무윤활일 때의 실제 마찰면적 차이가 점점 감소하고, 1180CP강판은 그 차이가 거의 없다.

2.3.3 마멸량 산출 및 고찰

초고강도강판은 마찰에 의해 발생하는 마멸량이 매우 작아 무게 측정에 의한 마멸량 계산이 불가능하다. 이에 본 연구에서는 마멸형상을 원뿔 형태로 단순화하였다[12]. 즉, 위 실험 결과의(Fig. 14) 실제 마찰 면적의 합을 밑면으로, 표면조도의 평균 변화량을 높이로 하는 원뿔의 체적을 마멸량으로 가정하고 Fig. 15와 같이 마멸량을 산출하였다. 다른 강판에 비해 1180CP강판은 마멸량이 매우 적고, 윤활에 따른 차이도 거의 없다. 이것은 1180 CP의 마찰계수 값이 실험변수 값의 증가에 따라 변하지 않고, 윤활의 영향도 받지 않는 현상에 대한 이유로 설명된다.

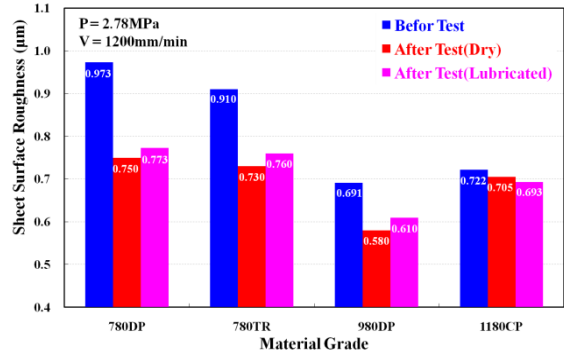


Fig.12 Changes in sheet surface roughness before and after friction test

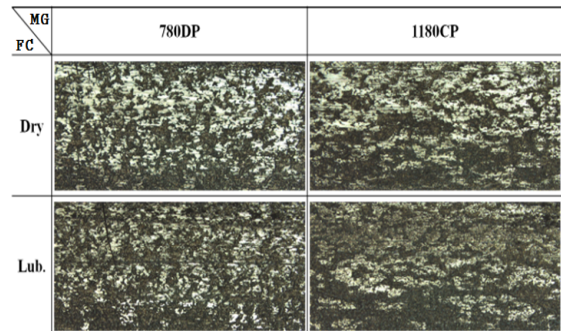


Fig.13 Micro-morphology of the sheet surface worn (FC : friction condition, MG : material grade)

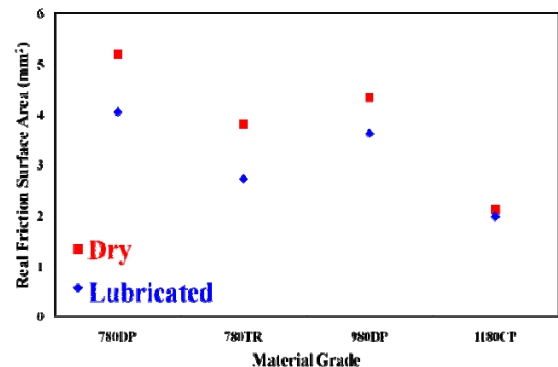


Fig.14 Real friction surface areas in various material grades

또한, 마찰계수는 Fig. 16과 같이 마멸량이 증가할수록 비례적으로 증가하는 경향을 보인다. 이는 마찰현상에 마멸량이 큰 영향을 미치고 있음을 보여주는 것이다. 그러나 마멸량은 다른 실험변수들과 교호작용이 성립되어 마찰모델에 사용되지 않는다.

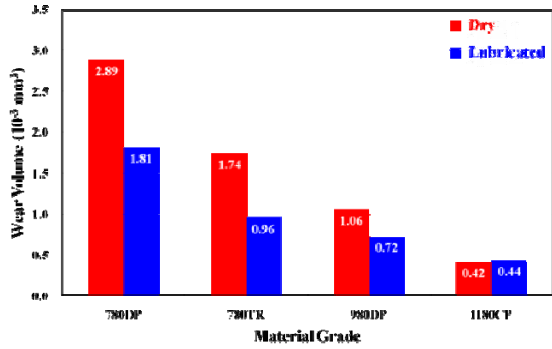


Fig.15 Comparison of wear volume of various material grades in dry and lubricated conditions

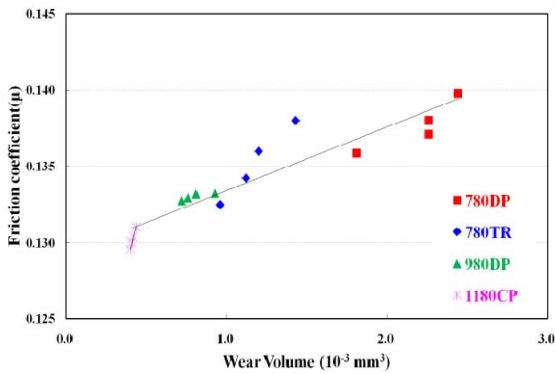


Fig.16 Friction coefficients associated with wear volumes

3. 결론

본 연구에서는 초고강도강판의 마찰인자들이 성형 중 마찰계수에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 다양한 마찰 실험 조건에서 마찰실험을 실시하고, 고강도강판의 마찰계수 값들을 비교하였다. 이러한 일련의 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 초고강도강판의 마찰계수는 윤활유 점도, 인출속도, BHP, 경도 값이 증가할수록 감소하지만, 표면조도의 증가에 따른 마찰계수의 변화는 U자형 거동을 한다.

(2) 780DP, 780TR, 980DP의 결과와 다르게 1180CP는 마찰변수 값이 증가하여도 마멸량의 변화가 거의 없어 일정한 마찰특성을 갖는다.

(3) 표면조도와 마찰면적으로 계산된 마멸량과 마찰계수는 선형적으로 증가하는 관계를 갖는다.

REFERENCES

- [1] J. M. Lanzon, M. J. Cardew-Hall, P. D. Hodgson, 1998, Characterising Frictional Behavior in Sheet Metal Forming, J. Mater. Process. Technol. Vol. 80-81, pp. 251~256.
- [2] D. P. Kotchman, I. Kim, C. Y. Sa, D. Lee, 1992, Determination of Frictional Behavior in Sheet Metals Using Orthogonal Arrays, J. Mater. Eng. Perform., Vol. 1, No. 4, pp. 555~564.
- [3] Z. L. Zhang, L. Chen, 1997, Study of the Friction Characteristics of Lubricants and Their Affecting Factors during Drawing, J. Mater. Process. Technol. Vol. 63, No. 1-3, pp. 144~147.
- [4] X. J. Wang, J. L. Duncan, M. L. Devenpack, 1983, Punch Friction Tests for Sheet Metal Forming, Am. Soc. Met., Vol. 3, No. 1, pp. 3~11.
- [5] Y. S. Kim, J. B. Nam, W. J. Choi, 1990, A Study of Frictional Characteristics of Galvanized Sheets for Automobiles, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 14, No. 6, pp. 1487~1494.
- [6] S. S. Han, 2011, Contact Pressure Effect on Frictional Behavior of Sheet Steel for Automotive Stamping, Trans. Mater. Process. Vol. 20, No. 2, pp. 99~103.
- [7] Y. S. Kim, M. K. Jain, D. R. Metzger, 2004, Proc. NUMIFORM(editor: Somnath Ghosh, Jose M. Castro, June K. Lee), American Institute of Physics, Melville, N.Y, USA, pp. 2265~2269.
- [8] A. Wihlborg, L. Gunnarsson, 2000, A Frictional Study of Uncoated EBT Steel Sheets in a Bending Under Tension Friction Test, Wear, Vol. 237, No. 1, pp. 129~136.
- [9] Y. T. Keum, B. H. Lee, 2002, Friction Model for Sheet Metal Forming Analysis(Part1: Experiment), Trans. Mater. Process., Vol. 11, No. 4, pp. 349~354.
- [10] J. W. Shim, Y. T. Keum, R. H. Wagoner, 2008, Proc. ICTP, The 9th, KAIST, Daejeon, Korea, pp. 279~280.
- [11] Y. T. Keum, J. W. Shim, 2007, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Autumn Conf.(editor: C. S. Lee), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 27~30.
- [12] K. H. Cho, T. H. Kim, S. S. Kim, 1998, Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube, Wear, Vol. 219, No. 1, pp. 3~7.