

튜브 액압성형 공정의 확관영역에서 소재 및 윤활에 따른 마찰 특성의 실험적 연구

이건엽¹ · 임홍섭¹ · 이성문¹ · 이해경¹ · 정기석² · 문영훈^{1,#}

Experimental investigation of friction in expansion zone of tube hydroforming with material and lubricant

G. Y. Lee, H. S. Yim, S. M. Lee, H. K. Yi, G. S. Chung, Y. H. Moon

(Received Month Day, Year)

Abstract

In this study, friction test was proposed to obtain coefficient of friction between tube and die in expansion zone of tube hydroforming and friction coefficients were evaluated at different materials, viscosity of lubricants and internal pressures. For this study, STKM11A and SUS tubes were prepared. The tube was expanded by an internal pressure against the tool wall. The tube was expanded by an internal pressure against the tool wall. By pushing the tube through the tool, a friction force at the contact surface between the tube and the tool occurs. From the measured geometries and FE analysis, the friction coefficients between tube and die at the expansion zone in tubular hydroforming can be estimated. The effects of the various internal pressures, viscosity of lubricants, tube materials and tube thickness on friction coefficients are discussed.

Key Words : Tube hydroforming, Coefficient of friction, Friction test, Lubricant

1. 서론

액압성형은 튜브형상의 원소재를 금형에 장착한 후 튜브 내부에 높은 액압을 부가하여 원하는 형상으로 성형하는 기술이다. 액압성형 공정을 자동차 부품의 제조에 이용하게 되면 기존에 금속 판재를 스탬핑, 용접, 조립하는 공정을 한 단계의 성형공정으로 대체할 수 있으므로 공정 단순화에 따른 경제성 향상과 차체 경량화 효과를 동시에 달성할 수 있는 장점이 있다. 액압성형 기술은 자동차 차체(subframe) 부품 제조에서 매우 활발하게

적용되어 미국, 일본의 자동차 업계에서도 활발히 적용되는 추세이다. 한편, 튜브액압성형이 이루어지는 동안 소재의 변형양상을 살펴보면, Fig. 1에서와 같이 축방향 압입이 일어나는 가이드영역과 튜브의 반경 방향으로 확관이 일어나는 확장영역으로 나눌 수 있다. 가이드 영역에서는 재료의 변형은 이루어지지 않지만 펀치의 축방향 압입력에 의해 특정한 내압 하에서 확장 영역으로 밀려들어가고, 확장영역은 재료가 확관 및 연신되면서 금형의 기하학적 형상에 맞춰지는 영역이다. 가이

1. 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

2. POSCO 자동차가공연구그룹

교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터,

E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

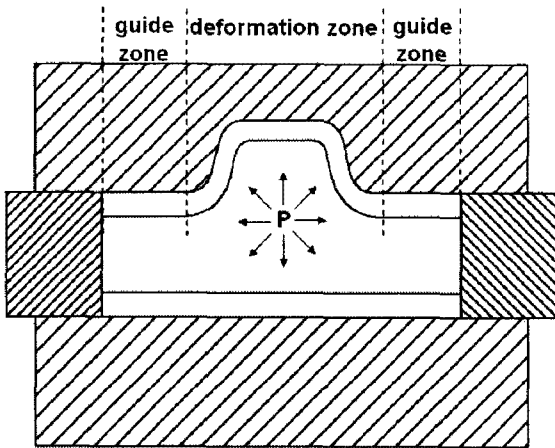


Fig. 1 Schematic drawing of friction zones in tube hydroforming

드 영역에서는 소재 내부의 압력에 의해 소재와 금형이 밀착된 상태에서 미끄러지면서 확장영역으로 소재를 유입시켜주기 때문에 마찰특성이 매우 중요하다. 또한 확장영역에서는 튜브가 반경방향으로 연신되면서 금형에 먼저 닿는 부분에 의해 마찰이 발생하면 그 부분에서의 두께감소가 일어나지 않아 소재의 두께가 균일하게 확장되지 않을 뿐 아니라 국부적인 두께 감소를 유발하여 조기파단의 가능성을 발생시키기 때문에 확장영역에서도 마찰특성이 액압성형성에 미치는 영향은 매우 크다[1~4]. 따라서, 본 연구에서는 튜브 액압성형 공정의 확장영역에서의 마찰계수를 산출하기 위한 마찰계수 측정 방법을 제안하고, 소재, 윤활 점도 그리고 내압에 따른 공칭마찰계수의 변화에 대해 고찰하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 소재 및 시험 장비

실험에 사용된 소재는 구조용 강관으로 상용화되어 있는 STKM11A 이고, 크기는 외경 50.8mm, 두께 2.0mm, 길이 150mm 이다. 강도에 따른 마찰계수의 변화를 분석하기 위해 같은 크기의 SUS321 튜브를 사용하였고 외경에 따른 마찰계수의 변화를 평가하기 위해 SKTM11A 의 외경 76.2mm 면서 길이와 두께는 동일한 튜브를 사용하였다. STKM11A 와 SUS321 의 기계적 특성을 table 1 에 나타내었다. 금형의 재질은 프레스 금형에 일반적으로 사용되고 있는 SKD11 이다. 시험에 사용된 장비는 80T 프레스를 이용하였고, 튜브의

Table 1 Mechanical properties of STKM11A and SUS321

	Yield strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
STKM11A	406.1	455.5	29.3
SUS321	276	621	45

이용하였고, 튜브의 양 끝단을 펀치로 실링(sealing)한 후 증압기(intensifier)를 이용하여 튜브 내부에 압력을 가하였다. 확장영역에서의 마찰계수를 도출하기 위해 소재와 금형이 접하여 마찰이 발생하는 부분과 확관율을 고려하여 Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 세 가지 모델을 선정하여 금형을 제작하였다. 확관 모델의 단면은 삼각형, 사각형, 육각형의 세가지로 선정하였고 이 때, 금형의 각형이 튜브의 외경과 내접하도록 설계하였다. 삼각형의 경우에는 경계길이비가 1.66, 사각형의 경우에는 1.27, 육각형의 경우에는 1.1 이고, 내접하는 점의 개수도 삼각형의 경우에는 3 개, 사각형의 경우가 4 개, 육각형의 경우가 6 개로 다양하게 변화시켰다. 세 가지 확관 형상에 대해 윤활조건과 내압 별로 확관시킨 다음 그림 3-6 에 나타낸 바와 같이 확관 튜브를 CT 촬영하여 단면을 iges 파일로 변환시켰다. 변환시킨 파일을 캐드 프로그램을 이용하여 그림 3-7 에 나타낸 바와 같이 확관 튜브의 확관형상, 두께분포, 및 충전길이 등을 측정하여 THF 후 확관 튜브의 성형형상 및 형상 치밀도를 평가하였다. 세 가지 확관 모델에 대해 마찰계수 별로 유한요소해석을 수행하여 실제 실험 후의 두께변화 및 충전 길이 등을 구하여 실제 윤활 조건에 따라 실험체의 측정치와 비교했

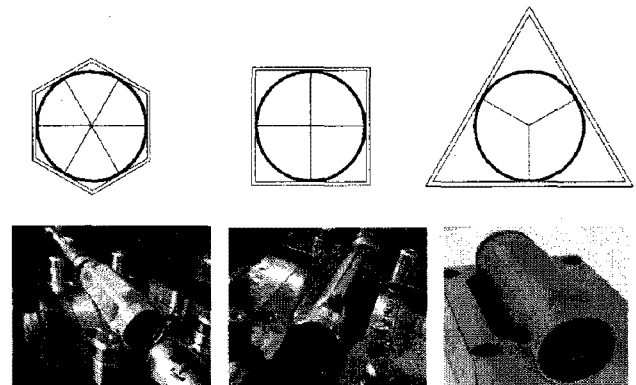


Fig. 3 Friction test images in expansion zone

을 때, 유사한 형태를 갖는 마찰계수를 확관영역에서의 마찰계수로 선정하였다

3. 실험 결과 및 고찰

각 형상에서의 형상치밀도를 평가한 형상의 위치를 Fig. 4에 그 길이를 Table 2~4에 나타내었다. 삼각형의 경우에는 확관율이 높았지만 금형에 닿는 길이는 작았고, 육각형의 경우에는 확관율은 작았지만 금형 표면에 닿는 면적이 제일 높았다. 각 형상에서의 확관 튜브를 Fig. 5에 나타내었다.

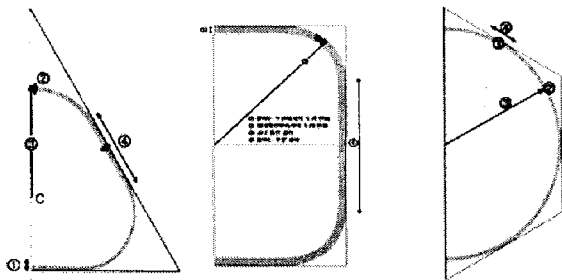


Fig. 4 Position of measured geometry

Table. 2 measured geometry of triangled die

	①	②	③	④
Teflon	1.86	1.79	30.60	9.29
1200K	1.91	1.80	29.40	9.26
400CT	1.95	1.82	28.64	9.22
320K	1.95	1.82	28.54	9.23
180K	1.94	1.82	28.55	9.21
No-Lub	1.99	1.80	28.43	9.20

Table. 3 measured geometry of triangled die

	①	②	③	④
Teflon	1.85	1.78	28.25	12.46
1200K	1.91	1.78	28.12	12.00
400CT	1.91	1.82	27.64	12.10
320K	1.94	1.82	27.54	12.10
180K	1.94	1.83	27.55	12.04
No-Lub	1.99	1.83	27.43	12.02

Table. 4 measured geometry of triangled die

	①	②	③	④
Teflon	1.89	1.78	27.20	15.00
1200K	1.91	1.78	27.00	14.91
400CT	1.93	1.81	26.30	14.45
320K	1.93	1.81	26.32	14.50
180K	1.95	1.84	26.00	14.24
No-Lub	1.99	1.84	25.87	14.10

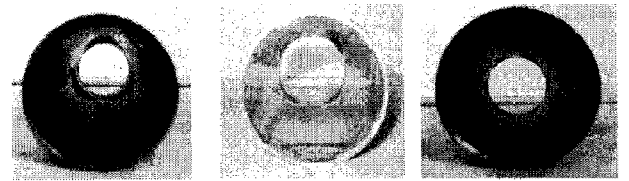


Fig. 5 Expanded tube at different geometry

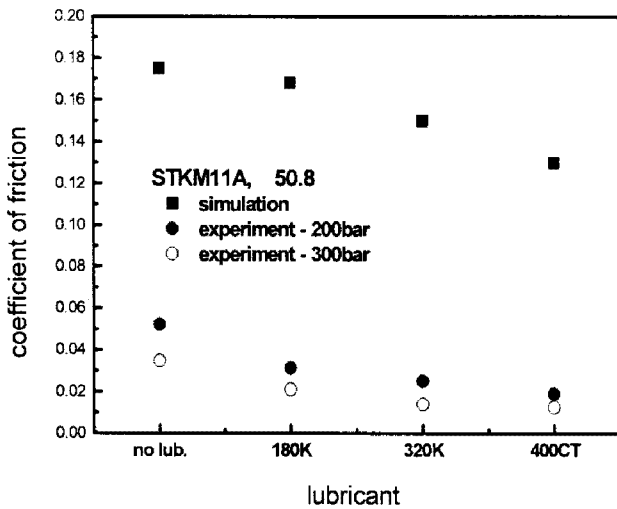
각 형상별로 마찰계수를 0.001~0.2까지 0.001 간격으로 유한요소해석을 수행하여 실제 실험치와 비교한 다음 가장 유사한 형상을 나타내었을 때의 마찰계수를 Table 5에 나타내었다. 윤활 종류에 따라서 테프론일 때가 0.001로 각 형상에 따라 유사하게 나타났고, 윤활점도가 낮아짐에 따라 마찰계수가 높아져 180K인 경우에는 0.17, 무윤활일 경우에는 0.176정도로 나타났다. 표 4-5에는 각 윤활 조건에 따른 마찰계수의 값을 나타내었다. 테프론일 경우에 가장 낮은 0.001 정도의 값이 나왔고, 무윤활일 때가 가장 높게 0.176으로 나타났다. 320과 400의 경우에는 미소한 차이를 나타내는 것으로 나타났다. Table 6에는 이와 같이 실험 한 결과 STKM11A와 SUS304의 확관영역에서의 마찰계수를 나타내었다. 강도가 상대적으로 높은 SUS304의 경우에는 STKM11A보다 0.04~0.07정도 높은 값으로 나타났다.

Table. 5 friction coefficients at different lubricants and cross section in expansion zone

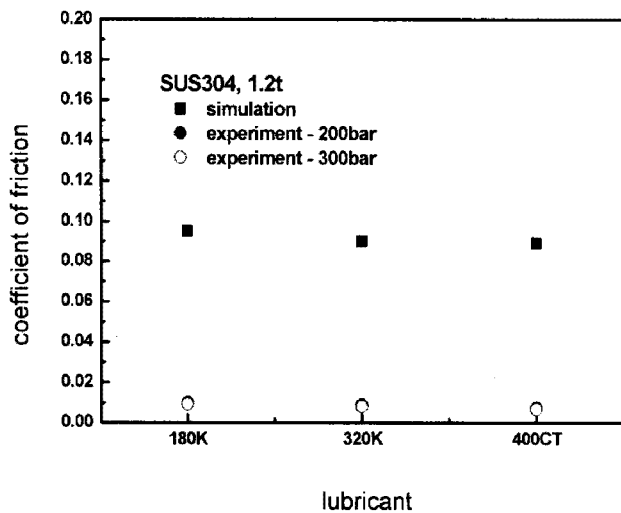
실험시 윤활조건	삼각형의 경우	사각형의 경우	육각형의 경우
Teflon	0.001	0.001	0.001
1200K	0.0081	0.008	0.0078
400CT	0.129	0.130	0.131
320K	0.147	0.150	0.155
180K	0.169	0.168	0.166
No-Lub	0.172	0.175	0.178

Table. 6 friction coefficients at different lubricants and materials in expansion zone

	STKM11A Ø50.8	SUS304 Ø50.8
400CT	$\mu = 0.130$	$\mu = 0.089$
320K	$\mu = 0.150$	$\mu = 0.090$
180K	$\mu = 0.168$	$\mu = 0.095$
No lub.	$\mu = 0.175$	-



(a) friction coefficients of STKM11A



(b) friction coefficients of SUS321

Fig. 4 Position of measured geometry

확관영역에서의 마찰계수는 가이드 영역[5]에서의 마찰계수보다는 큰 값으로 나타났고 그 정도를 Fig. 5에 나타내었다. 확관영역에서는 마찰계수가 두께변화나 내압에 민감하지 않은 것으로 나타났다. 또한 삼각, 사각, 육각에서 확관율은 달랐지만 마찰계수는 거의 유사한 것으로 나타났다.

4. 결 론

확관 영역에서의 마찰계수를 측정하기 위해 THF 시 마찰계수를 측정하는 방안을 제안하였다. 소재, 공정 변수, 윤활을 변화시켜가며 마찰계수를 측정 한 결과 소재의 강도가 높을수록 마찰계

수는 낮게 나타났다. 윤활변수에서는 점도가 높을수록 마찰계수가 낮게 나타났다. 확관영역에서의 마찰계수는 가이드 영역에서의 마찰계수보다는 큰 값으로 나타났다. 또한 삼각, 사각, 육각에서 확관율은 달랐지만 마찰계수는 거의 유사한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업의 일부 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] yeong-Maw Hwang, Li-Shan Huang, 2005, Friction tests in tube hydroforming, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 219, pp. 587~593
- [2] M. Ahmetoglu, K. Sutter, X. J. Li, T. Altan, 2000, tube hydroforming: current research, applications and need for training, J. Mat. Proc. Tech. Vol. 98, pp. 224~231
- [3] F. Vollertsen, M. Plancak, 2002, On possibilities for the determination of the coefficient of friction in hydroforming of tubes, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 125, pp. 412~420
- [4] T. Sokolowski, K. Gerke, M. Ahmetoglu, 2000, T. Altan, Evaluation of tube formability and material characteristics: hydraulic bulge testing of tubes, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 98, pp. 34~40
- [5] 이해경, 임홍섭, 이견엽, 이성문, 정기석, 문영훈, 2008, 튜브 액압성형 공정의 가이드영역에서 소재 및 윤활에 따른 마찰 특성의 실험적 연구, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집
- [6] Gracious Ngaile, Stefan Jaeger, Taylan Altan, 2004, Lubrication in tube hydroforming (THF): Part I. Lubrication mechanisms and development of model tests to evaluate lubricants and die coatings in the transition and expansion zones, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, Issue 1, pp. 108-115
- [7] Gracious Ngaile, Stefan Jaeger, Taylan Altan, 2004, Lubrication in tube hydroforming (THF): Part II. Performance evaluation of lubricants using LDH test and pear-shaped tube expansion test, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, Issue 1, pp. 116-123