

# 튜브 액압성형 공정의 가이드영역에서 소재 및 윤활에 따른 마찰 특성의 실험적 연구

이혜경<sup>1</sup>· 임홍섭<sup>1</sup>· 이건엽<sup>1</sup>· 이성문<sup>1</sup>· 정기석<sup>2</sup>· 문영훈<sup>1,\*</sup>

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

H. K. Yi, H. S. Yim, G. Y. Lee, S. M. Lee, 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 guide 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. By pushing the tube through the tool, a friction force at the contact surface between the tube and the tool occurs. From the recorded axial feeding forces, the friction coefficients between tube and die at the guide zone in tubular hydroforming can be estimated. The effects of the various internal pressures, viscosity of lubricants, tube materials, tube size and die coating on the friction forces and 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 소재가 확장 영역으로 밀려들어가고, 확장영역은 재료가 확관 및 연신되면서 금형의 기하학적 형상에 맞춰지는 영역이다. 가이드 영역에서는 소재 내부의 압력에 의해 소재와 금형이 밀착된 상태에서 미끄러지면서 확장영역으로 소재를 유입시켜주기 때문에 마찰특성

1. 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

2. POSCO 자동차가공연구그룹

\* 교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터,

E-mail: yhmoon@pusan.ac.kr

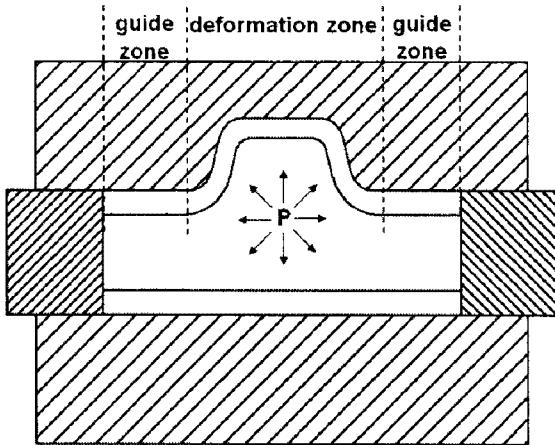


Fig. 1 Schematic drawing of friction zones in tube hydroforming

이 매우 중요하다. 또한 확장영역에서는 튜브가 반경방향으로 연신되면서 금형에 먼저 닿는 부분에 의해 마찰이 발생하면 그 부분에서의 두께 감소가 일어나지 않아 소재의 두께가 균일하게 확장되지 않을 뿐 아니라 국부적인 두께 감소를 유발하여 조기파단의 가능성을 발생시키기 때문에 확장영역에서도 마찰특성이 액압성형성에 미치는 영향은 매우 크다. 따라서, 본 연구에서는 튜브 액압성형 공정에서 가이드영역에서의 마찰계수를 산출하기 위한 마찰계수 측정 방법을 제안하고, 소재, 윤활 점도 그리고 내압에 따른 공칭마찰계수의 변화에 대해 고찰하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시험소재 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 양 끝단을 펀치로 실링(sealing)한 후 증압기(intensifier)를 이용하여 튜브 내부에 압력을 가하였다.

Table 2 Mechanical properties of STKM11A and SUS321

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

2.2 가이드 영역에서의 마찰계수 분석  
 가이드 영역에서는 유체에 의한 고압으로 인해 튜브와 금형이 접하고 있는 상태에서 슬라이딩이 이루어지기 때문에 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 튜브의 외측과 금형의 벽이 완전히 접하도록 금형을 설계, 제작 하였다. 튜브의 벽면에 작용하는 압력 수직항력( $F_n$ )과 마찰력( $F_f$ )으로부터 마찰계수는

$$\mu = F_f / F_n \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 튜브/금형 경계면에 작용하는 마찰계수가 튜브 길이방향으로 일정하다고 가정시 튜브 벽면에 걸리는 수직응력( $\sigma_n$ )은 튜브 내

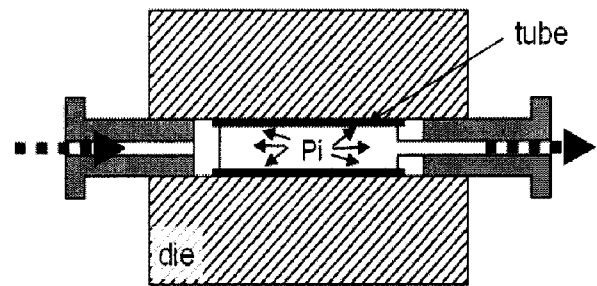


Fig. 2 Schematic drawing of friction test in guide zone

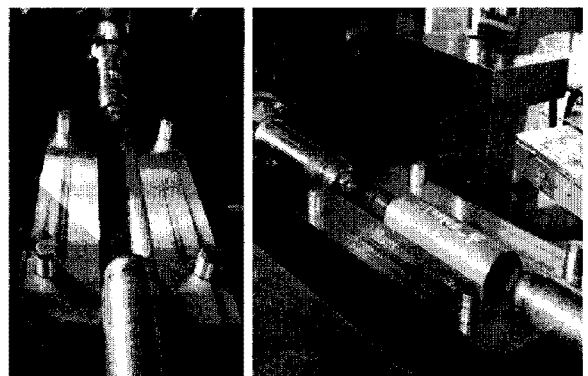


Fig. 3 Friction test die in guide zone

압( $P_i$ )과 동일하므로 수직항력( $F_n$ )은

$$F_n = \pi P_i D_o L \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있다. 튜브의 마찰력( $F_f$ )은 축방향 압입력( $F_a$ )으로 측정 가능하므로 마찰계수는

$$\mu = F_a / (\pi P_i D_o L) \quad (3)$$

과 같이 표현될 수 있다. 이때,  $F_a$  는 축방향으로 작용하는 마찰력이고  $L$  은 튜브의 길이이다. Fig. 3 에는 실제 제작한 가이드 영역에서의 마찰계수 측정 장치를 나타내었다. Fig. 2 에서와 같이 튜브의 벽면과 금형의 벽이 완전히 접하게 제작하였고, 직경에 대한 영향을 알아보기 위해 직경에 따라 두가지로 제작되었다. 액압성형 시의 마찰계수에 영향을 미치는 변수로는 크게 소재 변수, 공정 변수, 윤활조건, 금형변수 등을 들 수 있다. 먼저 소재변수로는 소재 종류를 STKM11A 와 SUS321 의 강종별 2 종류로 선정하고 직경에 대한 영향을 살펴보기 위해 STKM11A 종류에 대해서는 직경을 50.8mm 과 76.2mm 의 두 종류로 선정하였다. 윤활 변수로는 액체윤활에 대해서는 점도종류에 따라 3 종류로 선정하고, 필름윤활제인 테프론 테이프도 고려하였다. 또한 내압에 대한 영향을 살펴보기 위해 내압을 50~500bar 까지 변화시키면서 마찰계수를 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

내압과 윤활조건에 따른 마찰계수의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 무윤활상태에서 내압이 50bar인 경우에 마찰계수가 0.16으로 가장 높았고 내압이 높아질수록 윤활 점도가 높아질수록 마찰계수는 낮게 나타났다. 특히 윤활점도가 1200인 경우에는 50bar일 때 0.02, 내압이 500bar 일 때 0.005로 윤활 점도가 높을수록 내압에 따른 민감도는 줄어드는 것으로 나타났다. 소재의 직경이 일정하고 두께가 다를 때 마찰계수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 보는 바와 같이 압력이 높아짐에 따라서 마찰계수는 낮아지고 두께가 얇아짐에 따라서 마찰계수는 낮은 것으로 나타났다. 이는 직경이 다를 때도 같은 경향으로 나타났고 특히 직경에 대한 변화는 직경이 클수록 마찰계수가 더 낮아지는 것으로 나타났다. 특히 같은 압력에서는 윤활

점도가 1200인 경우에는 마찰계수의 변화가 거의 없었고 무윤활일 경우가 마찰계수의 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. 같은 200bar, 180K인 경우에 소재 두께가 2.0t에서 1.4t로 변화된 경우에는 0.031에서 0.019로 0.012정도 차이가 나는 것으로 나타났다. 같은 압력에서는 윤활 점도가 높을 수록 두께에 따른 마찰계수의 차이는 적어지는 것으로 나타났다. 강도에 따른 마찰계수의 변화를 알아 보기 위해 소재를 STKM11A 외에 SUS304와 321, 409 소재로 같은 시험을 수행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 강도가 높을수록 마찰계수가 낮아지는 경향을 나타내었고 강도가 낮을수록 내압의 변화에 민감한 것으로 나타났다. 압력에 대한 변화는 여전히 압력이 높을수록 마찰계수가 낮은 것으로 나타났다.

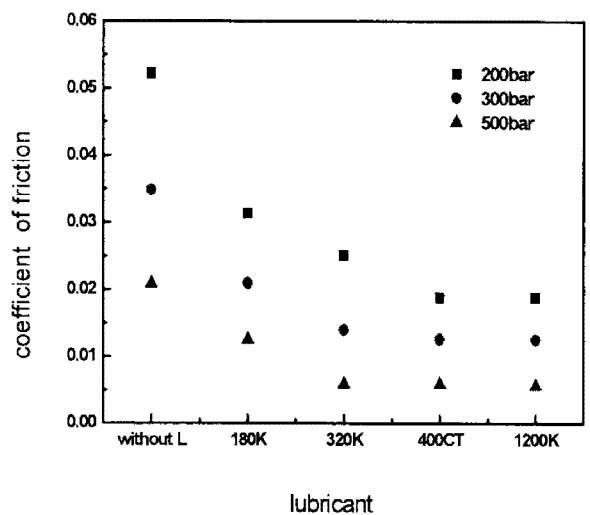
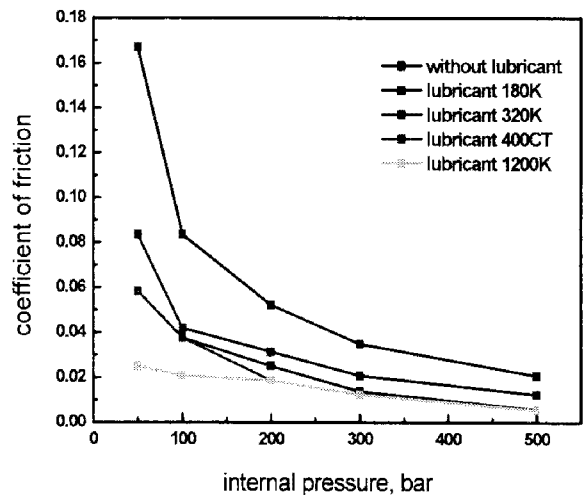
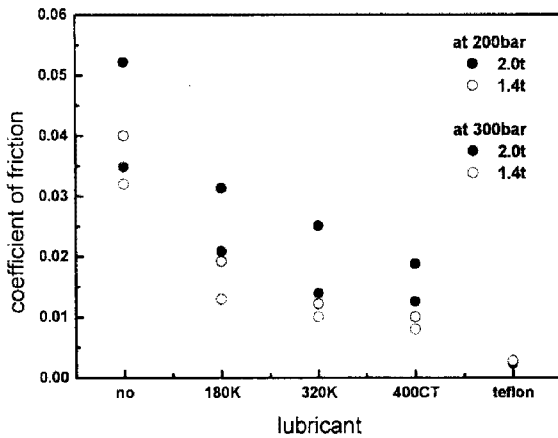
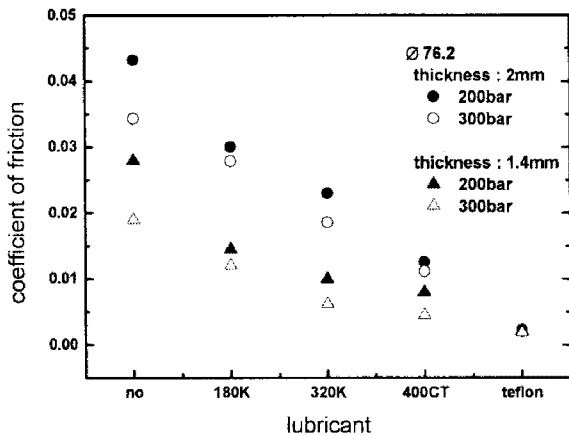


Fig. 4 Friction coefficient distribution at different lubricants and internal pressures



(a) at diameter 50.8mm



(b) at diameter 76.2mm

Fig. 5 Friction coefficient distribution at different diameters, internal pressures and lubricants

#### 4. 결론

가이드 영역에서의 마찰계수를 측정하기 위해 THF 시 마찰계수를 측정하는 방안을 제안하였다. 가이드 영역에서의 소재 변수, 공정 변수, 윤활변수, 금형 변수를 변화시켜가며 마찰계수를 측정한 결과 소재의 외경이 클 수록, 두께가 작을 수록, 강도가 높을수록 마찰계수는 낮게 나타났다. 윤활변수에서는 점도가 높을수록 마찰계수가 낮게 나타났고, 공정변수 측면에서는 내압이 높을수록 마찰계수가 낮은 것으로 나타났다. 또한 금형 변수에서는 무윤활 시에는 코팅을 한 경우가 더 낮게 나타났지만 윤활 시에는 코팅의 영향이 없는 것으로 나타났다.

#### 후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 국가핵

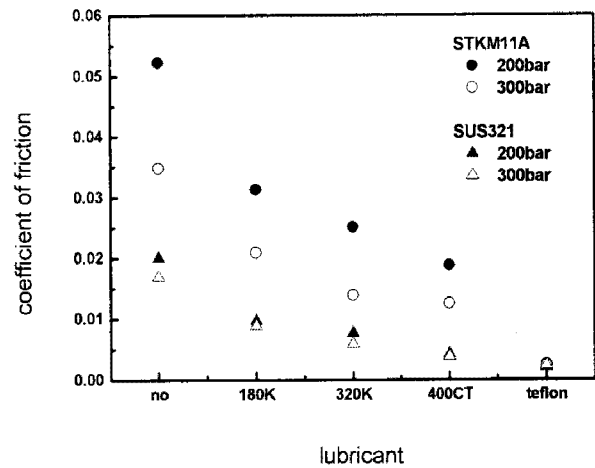


Fig. 6 Friction coefficient distribution at different materials, internal pressures and lubricants

심연구센터사업의 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] 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
- [6] 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