

## 튜브 하이드로포밍 공정에서의 마찰특성에 관한 연구

김영석\*·손현성\*\*·한수식\*\*\*

(2002년 2월 21일 접수)

### A Study on the Friction Characteristics in Tube Hydroforming Process

Y. S. Kim, H. S. Son and S. S. Han

#### Abstract

Tube hydroforming is a relatively new technology in comparison with conventional stamping process. Thus, there is no large knowledge base to assist the product and process designers, especially from the friction point of view. This paper covers the topic of friction and lubrication with regard to tube hydroforming. It presents the fact that frictional characteristic can have an effect on the formability of specific components. The presented concept describes the equipment which is required to determine the friction coefficient. Some example results of the friction and bulge test are shown.

**Key Words** : Tube Hydroforming, Friction, Lubricant

#### 1. 서론

튜브 하이드로포밍(Tube Hydroforming)은 튜브의 내부에 액체를 매개로 높은 압력을 발생한 후 튜브를 확장하여 외부에 설치된 금형에 밀착시켜 원하는 단면형상으로 성형하는 기술이다. 이 기술은 현재 자동차사가 직면하고 있는 차량의 경량화와 안정성 및 내구성 확보에 대한 사회적인 요구를 충족시킬 수 있어 독일, 미국 등 선진 자동차 업체에서는 이미 차체 프레임, 시트 프레임, 배기 시스템, 라디에이터 프레임 등에 활발히 적용되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 하이드로포밍 공정에서는 스탬핑 공정과 달리 작업 유체에 의한 고압하에서 튜브와 금형이 접촉하여

성형이 이루어지므로 판재성형의 경우와는 다른 마찰특성을 나타낸다.<sup>(4-5)</sup> 한편 서브프레임과 같은 복잡한 단면형상의 제품을 튜브 하이드로포밍에 의해 효과적으로 성형하기 위해서는 내압과 더불어 축방향 하중을 부가하여 축방향 재료 공급이 적극적으로 이루어져야 한다. 이런 축방향 하중의 부가에 의한 재료의 축방향의 유동은 튜브에 마찰저항을 야기하며 재료의 성형을 어렵게 하는 요인이 된다. 그러므로, 튜브 하이드로포밍 성형에서 적절한 윤활제와 적당한 축방향 하중의 선택은 마찰저항을 극복하고 액압에 의한 확관으로 얇아지는 튜브의 두께를 보상하기 위해서 필수적이다.<sup>(6)</sup>

Prier와 Schmoekkel<sup>(7)</sup>은 Fig. 1과 같이 전형적인 튜브

\* 경북대학교 기계공학부

\*\* 경북대학교 기계공학부 대학원

\*\*\* POSCO 기술연구소 자동차 강재 연구센터

하이드로포밍 공정에서 축방향 하중, 재료의 유입 및 급형의 기하학적 형상에 의존하여 가이드(guide), 천이(transition), 확장(expansion) 영역의 서로 다른 세 개의 마찰 영역을 설정하고 하이드로포밍의 마찰 특성을 결정하였다.

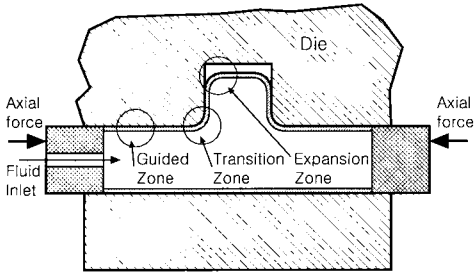


Fig. 1 Friction zones in tube hydroforming

본 연구에서는 Prier와 Schmoeckel의 경우에서처럼 가이드 영역을 대상으로 튜브의 재료, 윤활제, 급형의 표면 조건 등에 대한 마찰특성을 결정하는 실험장치를 설계·제작하여 여러 가지 윤활제의 마찰계수를 평가하였다. 또한, 확장 영역에서의 윤활제의 영향을 정성적으로 알아보기 위해 단순 사각 단면 형상을 갖는 급형을 이용한 성형실험과 유한요소해석을 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2는 200Ton급 PC제어형 액압성형 장비와 튜브 마찰실험에 사용된 장치의 급형 개략도이다. 액압성형 장비(Fig. 2(a))에서 좌우 펀치가 장착된 램의 용량은 각각 50Ton이고, 고압의 내압을 발생시키기 위해 사용한 공압부스터의 용량은 120MPa이다. 또한, 펀치의 속도는 0.1mm/s에서 15mm/s까지 0.1mm/s단위로 조절이 가능하고, 펀치의 최대 이동거리는 약 120mm이다.

마찰계수를 실험적으로 얻기 위해서 튜브의 양쪽에서 펀치로 밀봉시킨 후 튜브의 외면이 급형 내면에 균일하게 밀착되도록 내압을 가한다. 그 다음, 양쪽 펀치를 한쪽 방향으로 일정 속도로 이동시키면 튜브와 급형은 밀착된 상태로 함께 이동하게 되는데, 이때 발생하는 급형과 상하 면판 사이의 마찰의 제거를 위해 롤러베어링을 설치하였다. 급형이 로드셀에 닿으면 급형의 진행이 제한되므로 튜브만이 펀치에 의해 급형 면과 마찰을 일으키며 이동하게 되는데, 이때 로드셀에 의해 측정되는 하중이 바로 급형과 튜브 표면사이의 마찰력이 된다.

마찰계수  $\mu$ 의 값은 다음 (1)식에 의해 계산된다.

$$\mu = \frac{F_f}{P_i \pi D_i L} \tag{1}$$

여기서  $F_f$ 는 마찰력,  $P_i$ 는 내압,  $D_i$ 는 튜브의 내경,  $L$ 은 튜브의 유효길이이다.

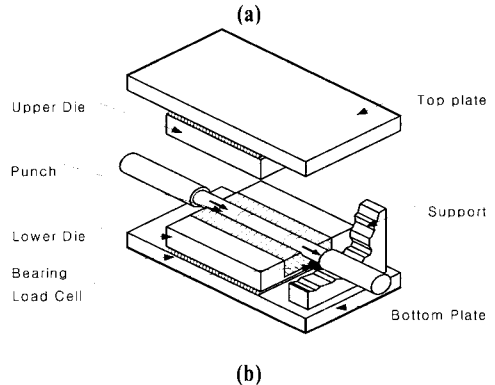
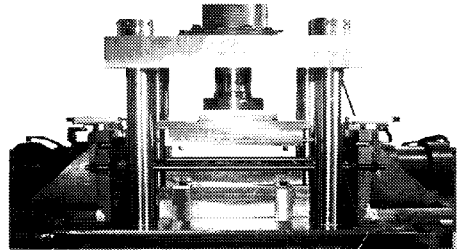


Fig. 2 (a) Photograph of PC controlled tube hydroforming equipment and (b) Schematic of the device used in friction experiments

실험에 사용된 급형의 재질은 프레스 급형에 일반적으로 많이 사용하고 있는 SKD11이고 마찰이 발생하는 부분의 표면조도는 산술평균 거칠기  $R_a=0.961\mu\text{m}$ 이다. 실험에 사용된 튜브의 크기는  $D_i 56.9 \times L150 \times t1.8\text{mm}$ 이고 재질은 구조용 강관 STKM11A이다. 또한, STKM11A의 기계적 성질은 Table 1과 같고, 표면조도는 산술평균 거칠기  $R_a=0.42\mu\text{m}$ 이다. 실험은 평면변형 하에서 STKM11A 튜브의 과열압력(bursting pressure)에 근사한 30MPa에서 행해졌다.<sup>(8)</sup>

실험에 사용된 윤활제는 모두 3종류로, 판재의 프레스 공정에서 많이 사용하고 있는 프레스가공유(press working oil) 겸 방청유의 일종인 동점도가 낮은 A-윤활유와 동점도가 높은 B-윤활유 그리고 낮은 마찰계수를 갖는 것으로 알려진 고체윤활제의 일종인 닥트로잉용 저밀도 폴리에틸렌 필름(Low Density Poly Ethylene film, LDPE film)이다. Table 2에 각종 윤활제의 기본적 성질을 정리하였다.

Table 1 Mechanical properties of STKM11A

Material	Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]	n value	R value
STKM11A	406.1	455.5	29.3	0.154	1.20

Table 2 Basic properties of several lubricants

Oil lubricant	Color	Specific gravity	Dynamic viscosity [cSt]		Ignition point [°C]	Application / Property
			Vertical	Horizontal		
lubricant (A)	dark brown	0.808	2.7	74		anti-rust, leveling
lubricant (B)	yellow	0.846	44.0	244		anti rust, lubrication, press deep drawing oil

Film lubricant	Color	Tensile strength [kg/cm <sup>2</sup> ]		Shear strength [kg/cm <sup>2</sup> ]		Elongation [%]		Application / Property
		Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	
LDPE (low density polyethylene) film	white clear	274.8	235.9	113.4	123.4	670.2	761.2	sheet metal stamping

3. 실험결과 및 고찰

가이드 영역의 마찰실험을 위해 구조용 강관 STKM11A 시편을 A-윤활유로 충분히 윤활한 다음, 속도 5mm/s, 내압 30MPa의 조건하에서 실험하여 얻은 이동거리-마찰하중 선도를 Fig. 3에 나타내었다. 하이드로포밍 공정에서의 마찰 특성은 고압의 유체가 튜브내에 작용하므로 일반 박판 성형에서의 마찰 특성과 다른 특징을 가진다. 즉, 일반 박판 성형의 경우 금형과 금형 사이에 판재상태로 존재하고 실제 마찰이 발생하는 진실 접촉면은 국부적이지만, 하이드로포밍의 경우 금형과 고압의 유체 사이에서 판재상태로 존재하고 상대적으로 진실 접촉면이 상당히 넓게 분포한다. 또한, 마찰하중은 시편의 이동 거리에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 이 실험결과는 실제 자동차 프레임 등의 하이드로포밍 공정에 서도 튜브의 마찰특성이 이동거리에 따라 국부적으로 변화한다는 것을 의미한다. 즉, 이동초기에는 내압에 의하여 시편표면의 돌기(asperity)에 해당하는 부분에서 윤활막이 깨어져 금형이 시편표면의 돌기부분에서 국부적으로 직접 접촉하였지만 이동이 진행될수록 기존의 돌기는 소성공괴되고 새로운 돌기와 접촉하게 된다. 이때의 윤활상태는 시편표면과 직접 접촉한 부분에서는 경계윤활

상태, 직접 접촉이 없는 부분에서는 유체윤활상태인 혼합윤활상태가 되고 이동거리가 커질수록 경계윤활영역이 점점 넓어져 마찰하중이 증가하게 된다. 실험이 완료된 시편사진(Fig.3의 삽입사진)으로부터 실제 마찰이 발생한 진실 접촉면이 시편 전체에 걸쳐 골고루 발생하였다는 것을 확인할 수 있다.

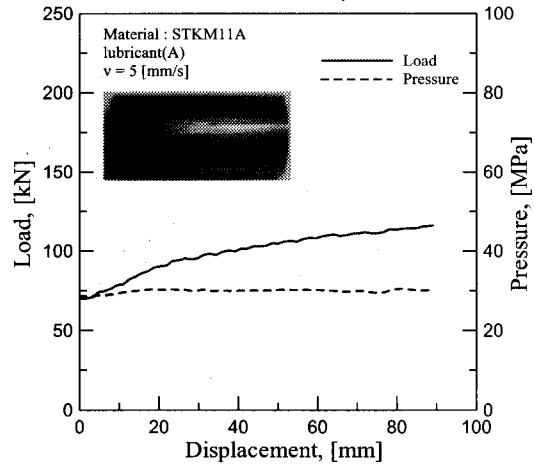


Fig. 3 Friction load under the constant pressure in tube hydroforming

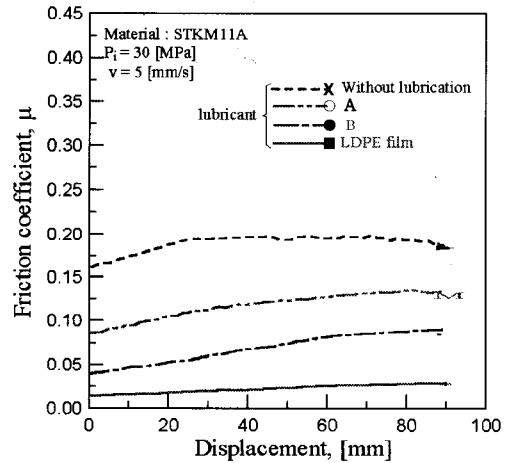


Fig. 4 Influence of lubricants on the friction coefficient

STKM11A 시편을 속도 5mm/s, 압력 30MPa의 조건하에서 각 종류의 윤활제를 사용한 경우와 전혀 윤활하지 않은 경우의 마찰계수 값을 Fig. 4에 비교하였다. 윤활을 전혀 하지 않은 경우의 마찰계수 값은 약 0.18정도로 가장 높았고, 닥드로잉용 LDPE 필름의 경우 마찰계수의 값은 약 0.02정도로 가장 낮았다. 또한, 저점도의 A-윤활유의 마찰계수 값은 고점도의 B-윤활유보다 약

2배 정도 높게 나타났다. 이상의 실험결과로부터 내압을 받는 튜브의 가이드 영역에서의 마찰계수는 윤활유의 점도가 높아질수록

$$\mu(\text{무윤활}) > \mu(\text{Lub. A}) > \mu(\text{lub. B}) > \mu(\text{LDPE film})$$

순서대로 작아지는 것을 알 수 있다.

전체적으로 A-윤활유와 B-윤활유는 이동거리 증가에 따라 마찰계수가 거의 선형적으로 증가하고 있으나 무윤활과 LDPE 필름으로 윤활한 경우는 마찰계수가 상대적으로 이동거리에 무관하게 거의 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다.

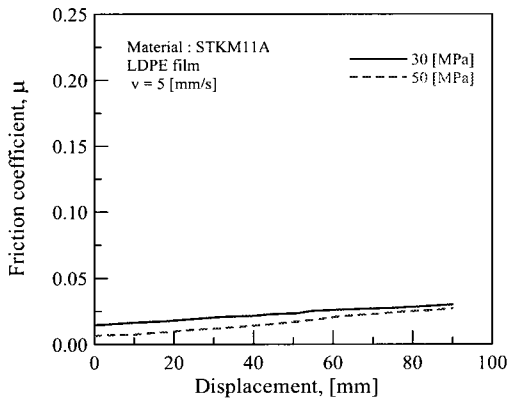


Fig. 5 Influence of internal pressure on the friction coefficient in case of using LDPE film

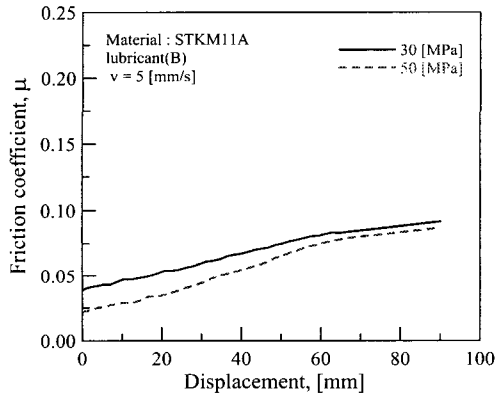


Fig. 6 Influence of internal pressure on the friction coefficient in case of using oil lubricant(B)

Fig. 5와 Fig. 6은 내압의 변화가 마찰계수에 미치는 영향을 나타낸다. Fig. 5는 LDPE 필름으로 윤활한 경우의 내압 변화에 대한 마찰계수 값이다. 속도가 5mm/s인 조건에서 내압을 30MPa와 50MPa의 두 가지 경우로 실험한 결과, 내압이 높을수록 마찰계수의 값은 다소 감소

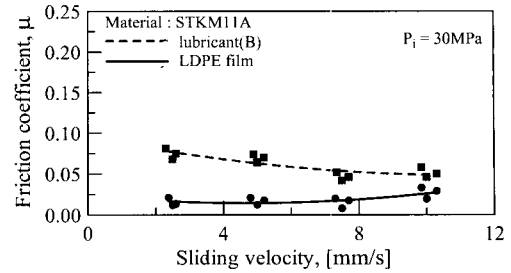


Fig. 7 Influence of sliding velocity on the friction coefficient

하는 경향을 보인다. 또한, B-윤활제를 사용한 Fig. 6에서도 Fig. 5와 동일한 경향이 나타났다. Fig. 7은 미끄럼 속도의 변화가 마찰계수에 미치는 영향을 파악하기 위해, 내압을 30MPa로 유지한 상태에서 속도를 2.5, 5.0, 7.5, 10.0mm/s로 다양하게 실험한 결과이다. B-윤활제의 경우 미끄럼 속도가 증가할수록 마찰계수 값은 점차 감소하는 경향을 보인다. 그러나, LDPE 필름의 경우 속도가 증가하여도 마찰계수의 변화는 미미한 것을 알 수 있다. 즉, 미끄럼 속도는 마찰계수에 하나의 변수로써 영향을 미칠 수 있고, 윤활제의 종류에 따라 다른 양상을 나타낼 수 있다.

본 연구에서 사용한 각 윤활유가 실제 확장영역을 갖는 하이드로포밍 공정의 성형성에 어떤 영향을 미치는지를 파악하기 위해 확장부의 한 변의 길이가 67.0mm인 사각 단면의 금형을 사용하여 초기 압력을 약 25MPa로 설정한 상태에서 파열 직전까지 성형실험을 실시하여 코너부의 충만도와 원주방향의 두께분포를 평가하였다. 즉, Fig. 8에서 알 수 있듯이, 윤활을 하지 않은 경우가 LDPE 필름을 사용한 경우보다 금형 코너부에서 생긴 곡률반경이 상대적으로 크고 재료가 코너부에 원활히 유입되지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 8의 성형경로로 각각 하이드로포밍된 액압성형품의 원주방향의 두께분포를 Fig. 9에 나타내었다. LDPE 필름을 사용한 경우 원주방향 변형이 균일하여 두께편차가 낮고 국부 네킹의 발생이 억제되고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 중에 도식한 것과 같이 튜브의 두께가 가장 얇은 곳은 윤활을 하지 않은 경우는 사각 금형의 코너부인 튜브와 금형의 접촉 경계부분에 위치하고, LDPE 필름을 사용하는 경우에는 원활한 재료의 유입으로 인해 접촉부의 중심부에 위치한다. 따라서 튜브 하이드로포밍에서 튜브의 변형 국소화에 의한 성형결함을 줄이고 성형성을 향상시키기 위해서는 금형과 튜브 사이의 윤활성 향상이 중요하다는 것을 알 수 있다.

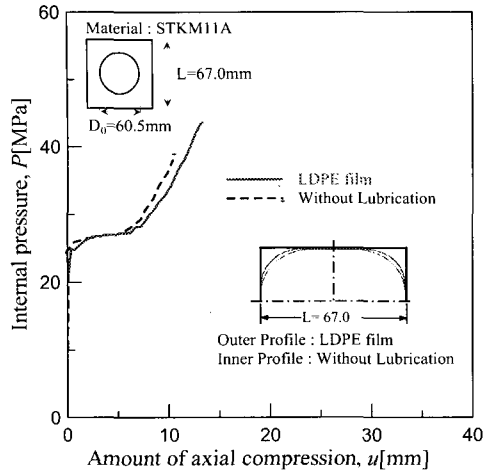


Fig. 8 Influence of lubrication condition on internal pressure along amount of axial compression

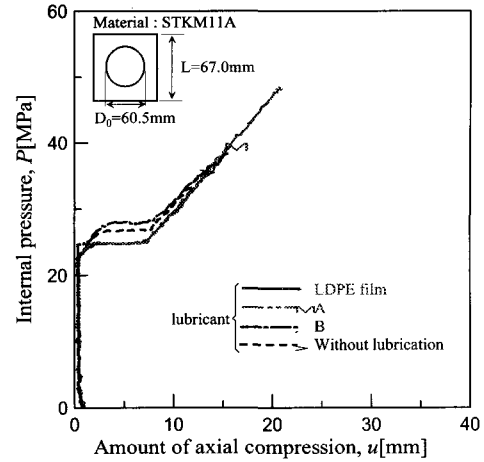


Fig. 10 Effect of lubrication at expansion zone; Diagram of internal pressure and amount of axial compression

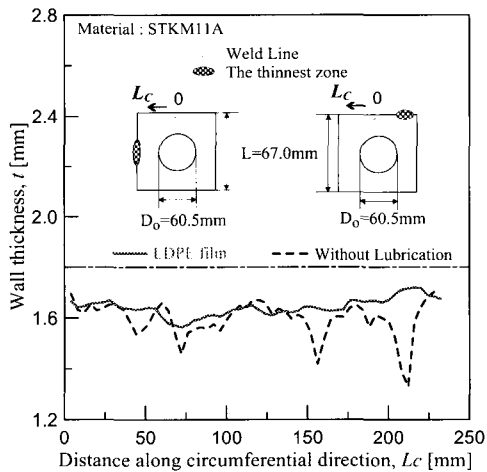
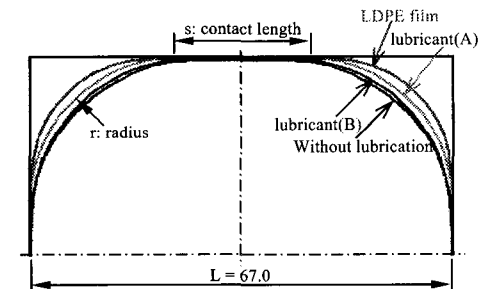


Fig. 9 Influence of lubrication condition on the distribution of wall thickness



Lubricant	r [mm]	s [mm]
LDPE film	16.50	34.00
lubricant (A)	21.50	24.00
lubricant (B)	23.10	20.80
Without lubrication	23.80	19.40

Fig. 11 Effect of lubrication at expansion zone; Contact length and radius of the specimen at die corner

Fig. 10과 Fig. 11은 확장 영역에서 윤활제의 영향을 정성적으로 알아보기 위해 가이드 영역의 마찰실험에 사용된 각 윤활제를 사용하여 단순 사각 단면으로 성형 실험한 결과이다. Fig. 10은 각 윤활제에 따른 파열압력까지의 축압축량과 내압의 성형경로를 나타낸 것으로, LDPE 필름의 경우가 관재 튜브의 파열압력이 가장 높은 것으로 나타났다. 하지만, A와 B-윤활유의 경우는 전혀 윤활하지 않은 상태와 비교하여도 큰 차이가 없어 성형이 되는 확장 영역에서는 윤활제로서의 역할이 미비함을 알 수 있다. 또한, A-윤활유를 사용한 경우가 B 윤활유의 경우보다 파열압력이 조금 높는데 이는 가이드 영역에서의 마찰계수의 결과를 나타내는 Fig. 4와 비교했을

때 서로 상반된다. 즉, 하이드로포밍에서 윤활유 별 마찰 특성은 마찰 영역에 따라 서로 다를 수 있음을 의미한다.

Fig. 11은 Fig. 10의 성형 경로를 갖는 하이드로포밍된 시편 단면의 형상과 치수로, 파열압력이 발생하도록 내압을 가한 후 파단 위치의 반대쪽 즉, 파단의 영향이 미치지 않는 온전한 성형 부위에서 측정된 결과이다. 파열압력이 높은 순서대로 사각 금형의 코너부에 채워지는 경향을 보인다.

A, B-윤활제만 고려했을 때, 가이드 영역의 마찰결과인 Fig. 4에서는 B-윤활제의 경우가 마찰계수 값이 낮지만, 확판시 단순 사각 단면 모양의 코너부에서 생기는 곡률반경은 A-윤활유의 경우가 B-윤활유의 경우보다

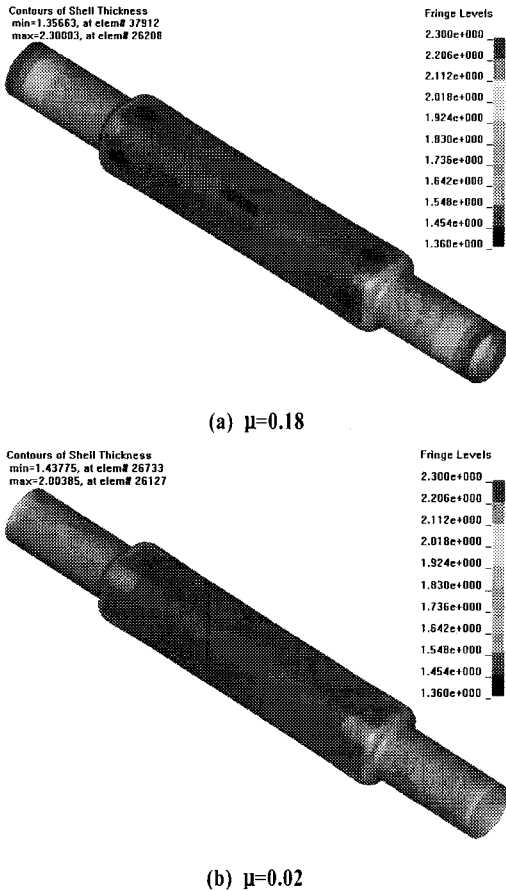


Fig. 12 FEM simulation of the tube hydroforming at expansion zone

더 작아 확장 영역에서는 A-윤활유가 유리하다. 따라서, 하이드로포밍의 마찰 특성은 가이드, 확장 영역 등의 서로 다른 마찰 상태에 따라 별도의 마찰실험이 요구됨을 알 수 있고, 이러한 실험은 하이드로포밍에서의 적절한 윤활제 선정에 위한 수단이 될 수 있을 것으로 사료된다.

이러한 실험적 결과를 평가하기 위하여 상용패키지인 DYNAFORM<sup>(9)</sup>을 사용한 유한요소해석과 비교한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 해석에서 사용된 마찰계수는 Fig. 4로부터 얻은 값을 선택하였다. 즉, 전혀 윤활하지 않은 경우 마찰계수로 0.18를, LDPE 필름의 경우는 0.02로 선택하였다.

Fig. 12(a)는  $\mu=0.18$ 인 경우에 대한 해석결과로 튜브의 두께분포를 나타낸 것으로 높은 마찰계수의 값에 의해 금형의 코너부에서 최대 두께 감소가 발생하고 있음을 나타낸다. 또한 편치로 밀봉되어 축압축력이 가해

지는 튜브의 끝 부분에서는 두께 증가가 관찰되고 있다. 반면,  $\mu=0.02$ 인 경우에 대한 Fig. 12(b)는 두께 분포가 비교적 균일하였으며 이는 실험결과인 Fig. 9와 잘 일치하는 경향을 보인다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 튜브 하이드로포밍 장비를 이용하여 여러 가지 윤활제에 대한 마찰실험 평가를 수행하였으며 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 가이드 영역에서 윤활유무, 내압변화, 윤활제의 종류 및 미끄럼 속도 등에 따른 튜브와 금형간의 마찰특성을 파악하였다.
- (2) 일반적인 윤활유를 사용하는 경우에 가이드 영역에서 튜브의 마찰계수는 윤활유의 점도가 높아질수록 낮아진다. 본 연구에서 사용한 윤활유별 마찰계수의 크기 순서는 다음과 같다.

$$\mu(\text{무윤활}) > \mu(\text{Lub.A}) > \mu(\text{lub.B}) > \mu(\text{LDPE film})$$

- (3) 내압을 받는 튜브의 마찰계수는 이동거리에 따라 증가하는 양상을 보이고, 내압이 높을수록 감소하는 경향을 보이며 미끄럼 속도가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다.

(3) 그러나 LDPE 필름을 사용하는 경우에는 이동거리와 이동속도에 무관하게 마찰계수는 항상 낮은 일정한 값을 갖는다.

(4) 단순 사각 단면 모양으로 튜브를 확장시켜 코너부에 생기는 곡률반경 및 파열압력으로 확장영역에서의 마찰특성을 평가하였다.

(5) 튜브의 파열직전의 코너 충만도로 평가한 윤활유의 성능은 가이드 영역에서 평가한 결과와는 달리 A-윤활유의 경우가 B-윤활유의 경우보다 우수하였다.

(6) 확장 영역에서 평가한 윤활유의 성능은 가이드 영역 영역에서 평가한 마찰계수의 우열과 다를 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 (주)현대자동차의 G7 프로젝트 연구비와 2001년도 두뇌한국21 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Ahmetoglu M., Sutter K., Li X. J. and Altan T.,

- 2000, "Tube hydroforming: current research, applications and need for training", J. Mat. Proc. Tech. Vol. 98, pp. 224~231.
- (2) Dohmann F. and Hartl C. 1997, "Tube hydroforming research and practical application", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 71, pp. 174~186.
- (3) Fuchizawa S. and Takeyama H. 1979, "Study on bulge forming of thin-walled cylinder (3rd report) experiment and comparison between experiment and analysis", J. Japan Soc. Precision Eng., Vol. 45, No.1, pp. 106~120.
- (4) 김영석, 남재복, 최원집, 1990, "자동차용 표면처리강판의 마찰특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집 Vol. 14, No.6, pp. 1474~1486.
- (5) 김영석, 김기수, 1994, "변형모드별 관재의 마찰특성 비교", 한국소성가공학회지, Vol. 3, No.1, pp. 51~62.
- (6) 김영석, 조홍수, 박춘달, 김영삼, 조완제, 2000, "Tube Hydroforming 공정의 성형성 평가", 한국소성가공학회지, Vol. 9, No.6, pp. 604~614.
- (7) Prier M. and Schmoeckel D. 1999, "Tribology of internal high pressure forming", Proceedings of the International Conference on Hydroforming, Stuttgart, Germany, October 12-13.
- (8) 김성태, 임성언, 이택근, 김영석, 2000, "관재 하이드로포밍에 의한 성형공정의 실험적 연구", 한국소성가공학회지, Vol. 9, No.6, pp. 35~42.
- (9) DYNIFORM PC V1.0, Engineering Technology Associates Inc. 1999