

# 튜브 하이드로포밍에서의 마찰과 윤활에 관한 실험적 연구

정승호\* · 손현성\* · 조흥수\*\* · 김영석\*\*\*

## An Experimental Study on the Friction and Lubrication in Tube Hydroforming

S. H. Jung, H. S. Son, H. S. Cho and Y. S. Kim

### 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. It also presents the results of test about several lubricants which are used in practical press process. The presented concept describes the equipment which is required to determine the friction coefficient.

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

### 1. 서 론

튜브 하이드로포밍(Tube Hydroforming)은 튜브의 내부에 액체를 매개로 높은 압력을 발생시켜 튜브를 확장시켜 외부에 설치된 금형에 밀착시켜 원하는 단면형상으로 성형하는 기술로, 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. 스템핑공정에서와는 달리 하이드로포밍공정에서는 작

업 유체에 의한 고압으로 인해 튜브와 금형이 접촉하여 성형이 이루어지므로 이에 따른 마찰현상이 발생하고, 이는 판재성형의 경우와는 다른 마찰특성을 나타내게 되므로 이를 규명할 필요성이 있다<sup>(1-3)</sup>. 단면의 형상이 변하는 자동차프레임을 금형의 코너부에서 재료의 두께감소 없이 효과적으로 성형하기 위해서는 축방향 하중이 부가적으로 필요하게된다. 재료의 유동방향이 직각으로 변하는 금형의 코너부에서 부품을 성형하기 위해서는 최소한의 저항과 재료의 이동이 필요하다. 그러므로, 적절한 윤활제와 적당한 축방향 하중(axial force)의 선택은 미끄럼 마찰(sliding friction)을 극복하고 재료와 공구의

\* 경북대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 현대자동차  
\*\*\* 경북대학교 공과대학 기계공학과

흡착 및 마멸과 좌굴을 줄이기 위해서 필수적이다.

윤활은 튜브의 단면이 최종형상으로 늘어나서 성형될 때 중요한 인자가 된다. 하이드로포밍공정에서는 재료가 최종 형상으로 성형되기 위해 국부적으로 늘어나기 때문에 튜브의 표면이 금형과 접촉하는 순간 마찰면이 생성되고 변형을 분포는 더 이상 균일하지 않게 된다. Fig. 1에서 소재 튜브의 단면 AB는 내압에 의해 금형 표면과 접촉하여 CD의 길이로 늘어난다. 이러한 재료의 신장을 튜브에 넓게 분포시키기 위해서는 마찰은 적어야 하고, 재료는 변형 영역으로 유입되어야만 한다. 따라서 복잡한 형상을 가진 부품의 성형성을 향상시키기 위해서는 다음과 같은 인자들이 하이드로포밍공정에 미치는 영향을 정립할 필요가 있다<sup>(4)</sup>:

- 윤활제 (lubricant);
- 내부 압력 (internal pressure);
- 미끄럼 속도 (sliding velocity);
- 작업 시편과 금형의 재료 (material);

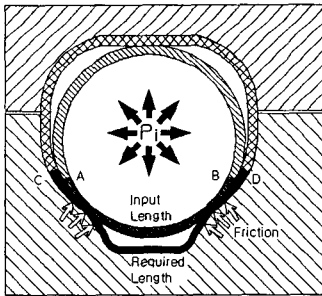


Fig. 1 Friction interface in tube hydroforming

윤활제는 작업공정 동안에 적용과 제거가 용이해야 할 뿐만 아니라 어떠한 오염물질도 포함하고 있어서는 안 된다. 그리고, 하이드로포밍공정은 고압에서 이루어지므로 윤활제는 고압에서 그 특성을 유지해야 한다. 또한 윤활제는 마찰면에서 발생하는 마찰열을 고려한 윤활성 면에서 끓는점이 높은 것을 적용하는 것이 좋다. 공작물 표면에는 가공이 완료된 후에도 윤활제 찌꺼기들이 남아 있으므로, 도색작업과 같은 후속공정을 수행하기 전에 이러한 찌꺼기들을 깨끗이 제거하여야 한다<sup>(5)</sup>. 고체윤활제(dry lubricants)는 마찰을 줄이고 공구의 수명을 향상시키는데 더 효과적이고 압력 매개물과도 호환성이 매우 좋다고 알려져 있으나 그것을 제거하기 위해서는 특별한 세척용액(washing fluid)이 필요하므로 액체윤활제 보다 더 많은 비용이 들게 되고 세척용액에 의한 환경오염 문

제도 발생하게 된다. 따라서, 좋은 하이드로포밍 윤활제의 선택조건은 다음과 같다:

- 금형과 튜브 표면사이의 미끄럼 마찰을 줄이는 윤활성 (lubricity);
- 고압 하에서의 내구성 (durability);
- 금형 마멸의 최소화 (minimum abrasivity);
- 압력 매개물과의 호환성 (compatibility);
- 제거의 용이성 (washable);
- 경제성 (cost);
- 환경 친화 (earth friendly);

Prier와 Schmoeckel<sup>(6)</sup>은 Fig. 2와 같이 전형적인 튜브 하이드로포밍공정에서 축방향 하중, 재료의 유입 및 금형의 기하학적 형상에 의존하여 가이드(guided), 천이(transition), 확장(expansion) 영역의 서로 다른 세 개의 마찰 영역을 설정하였다. 가이드 영역에서 재료는 변형하지 않지만 펀치의 축방향 하중에 의해 특정한 내압 하에서 변형 영역으로 밀려들어간다. 천이 영역은 변형이 일어나는 영역이다. 확장 영역은 재료가 금형의 기하학적 형상에 맞추어지는 영역이다. 하이드로포밍공정에서의 마찰 특성을 결정하기 위해서 이 세 가지 영역은 구분되어야 한다.

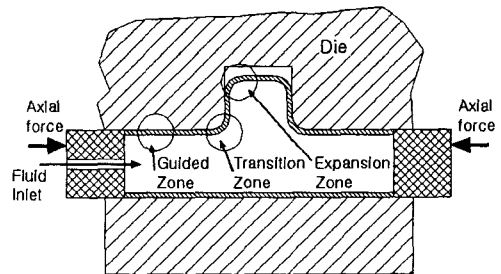


Fig. 2 Friction zones in tube hydroforming

이 논문에서는 Prier와 Schmoeckel의 경우에서처럼 가이드 영역(guided zone)에 한해서 튜브의 재료, 윤활제, 금형의 표면 조건에 대한 마찰특성을 결정하고 여러 가지 윤활제를 평가하는 데에 그 목적이 있으며, 마찰계수를 결정하는데 이용된 장치의 개념을 제시하고, 또한 확장 영역(expansion zone)에서의 윤활제의 영향을 정성적으로 알아보기 위해 각 윤활제에 대한 사각단면 형상을 갖는 금형에서의 성형실험 결과도 함께 제시하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 3은 실험에 사용된 장치의 금형 개략도이며, 200Ton급 PC제어형 액압성형 장비에 장착된다. 마찰계수를 실험적으로 얻기 위해서 튜브의 양쪽에서 실링 펀치로 밀봉시킨 후 일정한 내압을 가하여 튜브의 외면이 금형 면에 균일하게 밀착되도록 한 다음, 양쪽의 펀치를 일정한 속도로 실링을 유지하면서 한 쪽 방향으로 이동시킨다. 이 때 금형과 상하 면판 사이의 마찰을 제거하기 위해 롤러베어링을 설치하였고, 내압에 의해 튜브와 금형은 밀착되어 같이 이동한다. 금형이 로드셀에 닿으면 금형의 진행이 제한되고 튜브만이 펀치에 의해 금형면과 마찰을 일으키며 이동하게 된다. 이 때 로드셀에 의해 측정되는 하중이 바로 금형과 튜브표면사이의 마찰력이 된다.

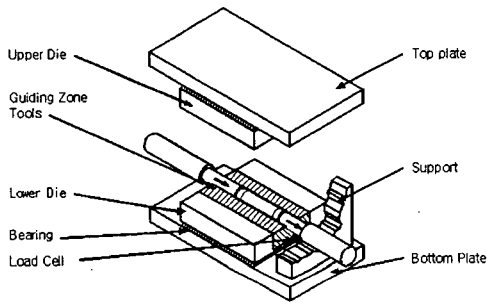


Fig. 3 Schematic of the device used in friction experiments

따라서 마찰계수  $\mu$ 의 값은 다음 식에 의해 계산된다.

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \quad (1)$$

여기서  $F_f$ 는 마찰력이고,  $F_N$ 은 내압에 의해 튜브의 벽면에 작용하는 수직항력이다. 수직항력  $F_N$ 은 내압과 튜브의 기하학적 형상에 의해 다음 식과 같이 계산된다.

$$F_N = P_i \pi D_0 L \quad (2)$$

여기서  $P_i$ ,  $D_0$ ,  $L$ 은 각각 내압, 튜브의 외경, 튜브의 길이이다.

실험에 사용된 금형의 재질은 양산용 프레스 금형에 일반적으로 많이 사용하고 있는 SKD11이고 마찰이 발생하는 부분의 표면조도는 산술평균 거칠기  $R_a=2.09\mu\text{m}$ 이다. 그리고, 실험에 사용된 튜브의 크기는  $D_0=60.5 \times$

$L150 \times t1.8\text{mm}$ 이고 재질은 구조용 강관 STKM11A이며, 표면조도는 산술평균 거칠기  $R_a=0.42\mu\text{m}$ 이다. 실험은 단순성형상태 하에서 STKM11A 튜브의 파열압력(bursting pressure)에 근사한 30MPa과 그것의 두 배인 60MPa에서 행해 졌다<sup>(7)</sup>. 실험에 사용된 윤활제는 일반적으로 판재의 프레스공정에서 많이 사용하고 있는 드로잉유(drawing oil) 및 방청유로서 METO G-100 (H-NO)510535, Castrol AH 29/98 Blank Wash, Castrol AH 37/93 Blank Wash, VETO 1080 HF, P-DBH(A), 그리고 고체윤활제의 일종인 딥드로잉용 저밀도 폴리에틸렌 필름(Low Density Poly Ethylene film)이다.

실험장치의 좌우 실링 펀치가 장착된 램의 용량은 50Ton이고, 내압을 발생시키는 공압부스터를 이용한 증압기의 용량은 120 MPa, 펀치의 속도는 0.1mm/s에서 15mm/s까지 0.1mm/s 단위로 조절이 가능하고, 펀치의 최대 이동거리는 대략 120mm이며, 이 거리는 15mm/s의 최대 속도로 이동이 가능한 거리이다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 구조용 강관 STKM11A를 윤활제 METO G-100 (H-NO)510535, 속도 5mm/s, 압력 30MPa의 조건하에서 실험하여 이동 거리에 따른 마찰하중과 내압의 분포를 나타낸 것이다. 내압이 30MPa(공압부스터의 사용으로 약간의 변동이 존재함)으로 비교적 일정하게 유지되었고, 마찰하중은 이동거리에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 하이드로포밍공정에서의 마찰 특성은 시간에 따라 국부적으로 변화함을 나타낸다. 그리고, 시편 표면에 금형 표면과의 마찰에 의해 굽힌 자국이 균일하게 분포되어 있는 것을 볼 수 있는데, 굽힌 자국은 실제 마찰이 발생하는 진실 접촉면이 나타난 곳이며 마찰이 시편 전체에 걸쳐 골고루 발생하였다는 것을 의미한다.

한편, 일반 구조용 강관 STKM11A를 속도 5mm/s, 압력 30MPa의 동일한 조건하에서 여러 종류의 윤활제를 사용한 경우와 전혀 윤활하지 않은 경우의 마찰계수 값에 대한 비교가 Fig. 5에 나타나 있다. 윤활이 전혀 되지 않은 경우의 마찰계수 값이 가장 크고, 딥드로잉용 저밀도 폴리에틸렌 필름(LDPE film)의 경우 마찰계수의 값이 가장 작다. 그리고, METO G-100 (H-NO)510535의 경우는 LDPE 필름의 경우와 근사한 마찰계수 값을 나타내고 있으며, P-DBH(A)와 VETO 1080 HF도 서로 비슷한 마찰계수 값을 나타내고 있음을 보여준다.

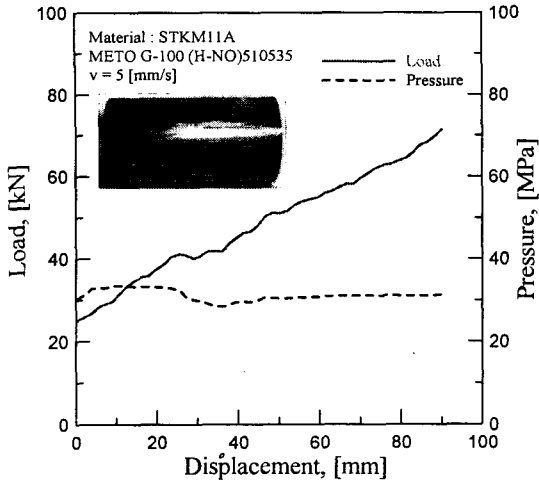


Fig. 4 Friction load under the constant internal pressure

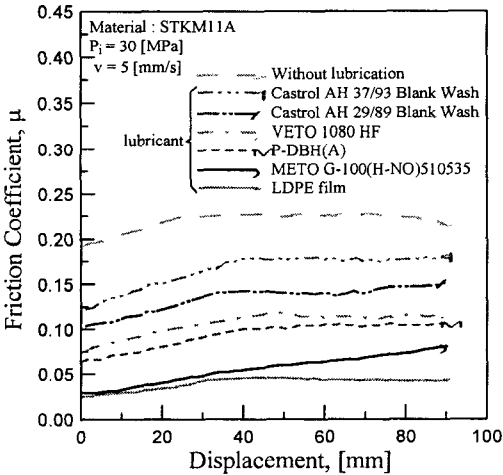


Fig. 5 Influence of lubricants on the friction coefficients

그리고 Castrol AH 29/98 Blank Wash와 Castrol AH 37/93 Blank Wash의 경우는 다른 윤활제에 비해서 비교적 높은 값의 마찰계수를 나타내고 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 미끄럼 속도의 변화가 마찰계수에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 6은 가장 낮은 마찰계수를 나타낸 뿔드로잉용 저밀도 폴리에틸렌 필름(LDPE film)으로 윤활된 경우의 속도변화에 대한 마찰계수 값이다. 실험 조건은 내압 43MPa에서 속도를 각각 5, 7.5, 10mm/s의 세 가지 경우로 변화시킨 것이다. 그 결과 미끄럼 속도가 5mm/s인 경우보다 7.5mm/s, 10mm/s인 경우에 마찰계수 값이 증가하는 경향을 보이지만 그 값의 차이는 매우 작다. 또한 7.5mm/s와 10mm/s의 경우 거의 비슷한 마찰계수 값을 나타내고

있다.

그리고 두 번째로 낮은 마찰계수 값을 나타낸 METO G-100 (H-NO)510535으로 윤활된 경우의 속도변화에 대한 마찰계수의 값이 Fig. 7에 나타나 있다. 실험은 Fig. 6의 경우와 동일한 조건에서 행해졌으며 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마찰계수의 값이 증가하는 경향을 보여준다. 전반적으로 마찰계수가 낮은 윤활제의 경우는 미끄럼 속도의 차이에 따른 마찰계수의 변화가 작으나 마찰계수가 높은 윤활제의 경우는 미끄럼 속도의 차이에 따른 마찰계수의 변화가 큰 것을 알 수 있다.

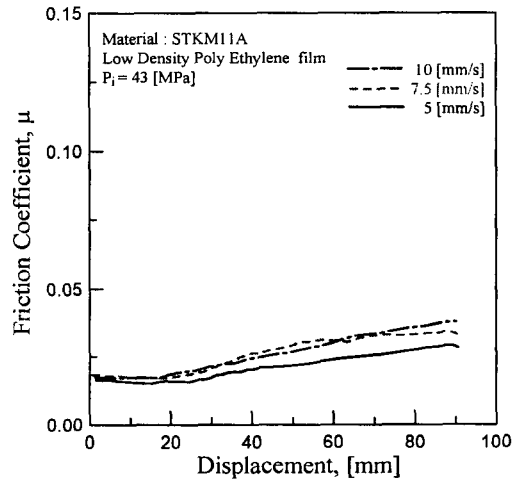


Fig. 6 Influence of sliding velocity on the friction coefficients using LDPE film

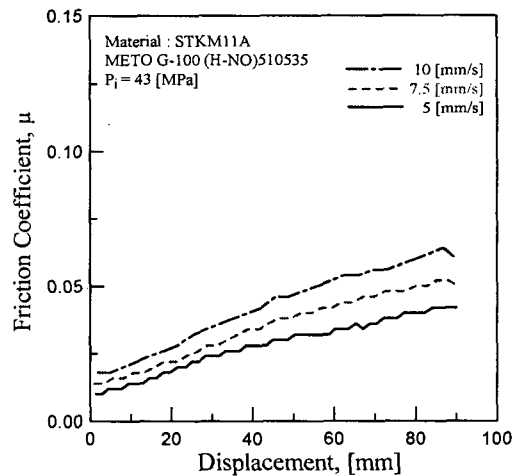


Fig. 7 Influence of sliding velocity on the friction coefficients using METO G-100 (H-NO)510535

이상에서 살펴 본 각 윤활제에 대해서, 확장 영역(Fig. 2)에서의 윤활효과를 정성적으로 알아보기 위해, 사각단

면을 가진 금형에서 성형실험을 실시하였다. 본 실험은 환관부의 한 변의 길이가 67.0mm인 사각단면의 금형에 시편을 위치시키고 실링 펀치를 전진시켜 튜브의 양단을 밀봉한 후 초기 압력을 약 25MPa로 높은 상태에서 파열(bursting)될 때까지 성형한 결과이다.

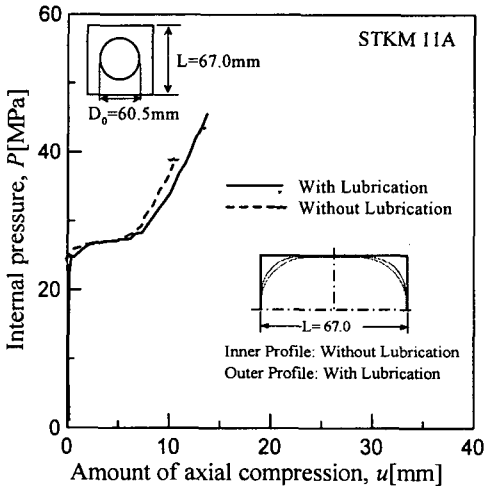


Fig. 8 Influence of lubrication on the bursting pressure along amount of axial compression

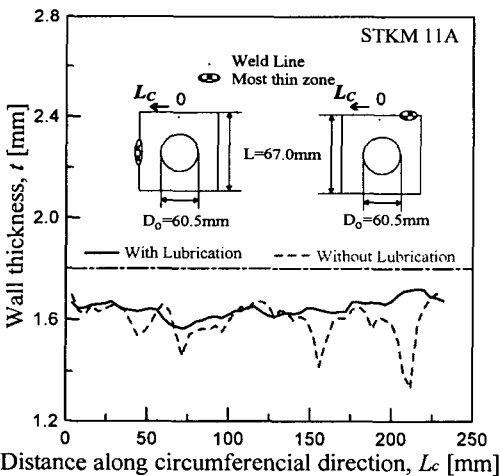
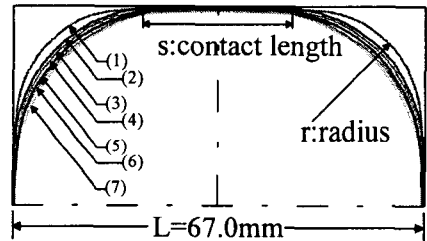
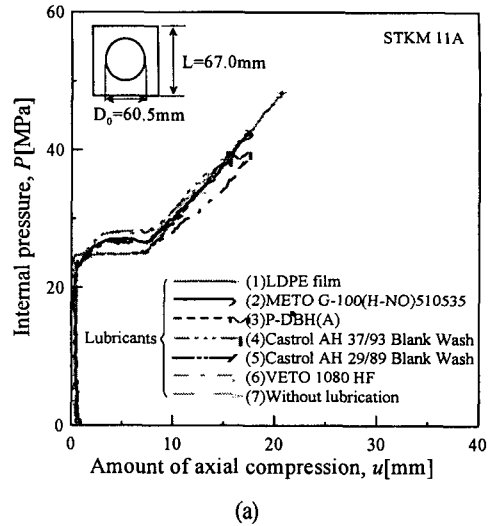


Fig. 9 Influence of lubrication on the distribution of wall thickness

Fig. 8은 윤활유무에 따른 내압-축압축량 선도이며 사각금형의 모서리부분에 튜브가 채워지는 효과를 도식적으로 나타내었다. 그리고 윤활유무에 따른 성형부의 원주방향 두께분포를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 바와 같이 윤활제의 사용이 성형성 향상에 상대적으로 유리함을 알 수 있으며, 윤활제를 사용한 경우

원주방향 변형이 균일하여 두께편차가 작아지고 국부 necking의 발생이 억제되면서 금형 모서리부로 재료가 효율적으로 유입됨을 알 수 있다.



No	Lubricant	r (mm)	s (mm)
1	LDPE film	16.50	34.00
2	METO G-100	20.45	26.10
3	P-DBH(A)	21.50	24.00
4	Castrol AH 37/93	22.30	22.40
5	Castrol AH 29/89	22.85	21.30
6	VETO 1080 HF	23.10	20.80
7	Without lubrication	23.80	19.40

Fig. 10 Effects of lubrication at expansion zone: (a) Diagram of internal pressure and amount of axial compression; (b) Contact length and radius of the specimen

Fig. 10은 확장 영역에서의 윤활제의 영향을 정성적으로 알아보기 위해서 가이드 영역의 마찰실험에 사용된 각 윤활제를 사용하여 사각 성형실험을 실시한 결과이다. Fig. 10(a)는 각 윤활제에 따른 축압축량과 내압의 차이를 나타낸 것으로, 가이드 영역에서와 마찬가지로

LDPE 필름과 METO G-100(H-NO)510535의 경우가 윤활효과가 가장 양호한 것으로 나타났지만, VETO 1080 HF의 경우는 다소 윤활효과가 떨어지는 것으로 나타났다. Fig. 10(b)는 사각 성형실험을 한 시편의 단면을 비교한 것으로, Fig. 10(a)에서와 동일한 순서로 사각 금형의 모서리부에 채워지는 결과를 보이고 있다. 따라서, 확장 영역에서의 각 윤활제의 윤활효과는 미소한 차이가 있지만 전반적으로 가이드 영역의 마찰 실험 결과와 비슷한 순서로 성형성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 튜브 하이드로포밍 장비를 이용하여 마찰실험과 함께 여러 가지 윤활제에 대한 평가를 수행하였으며 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1)윤활유무, 윤활제의 종류 및 미끄럼 속도 등에 따른 튜브와 금형간의 마찰특성을 파악하였다.

(2)가이드 영역에서 여러 가지 윤활제에 대한 평가와 확장 영역에 대한 정성적인 평가를 수행하였다.

#### 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) 김영석, 남재복, 최원집, 1990, "자동차용 표면처리강판의 마찰특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집 Vol.14, No. 6, pp.1474-1486.
- (2) 김영석, 김기수, 1994, "변형모드별 판재의 마찰특성 비교", 한국소성가공학회지, Vol.3, No.1, pp.51-62.
- (3) 김영석, 조홍수, 박춘달, 김영삼, 조완제, 2000, "Tube Hydroforming 공정의 성형성 평가", 한국소성가공학회지, Vol.9, No.6, pp.604-614.
- (4) Ahmetoglu M., Sutter K., Li X. J., Altan T., 2000, "Tube hydroforming: current research, applications and need for training", J. Mat. Proc. Tech. Vol.98 pp.224-231.
- (5) 김영석, 1995, "프레스 가공성이 우수한 방청윤활유의 개발(1)", 대한기계학회논문집, Vol.19, No.10, pp.2527-2536.
- (6) Prier M., Schmoeckel D., 1999, "Tribology of internal high pressure forming", Proceedings of the International Conference on Hydroforming, Stuttgart, Germany, October 12-13.
- (7) 김성태, 임성언, 이택근, 김영석, 2000, "관재 하이드로포밍에 의한 성형공정의 실험적 연구", 한국소성가공학회지, Vol.9, No.6, pp.35-42.