

〈論 文〉

모델재를 이용한 회전단조 공정의 시뮬레이션

윤덕재* · 최석우* · 나경환* · 김종호**

Simulation of Rotary Forging Process by Model Material Technique

D. J. Yoon, S. Choi, K. H. Na and J. H. Kim

Abstract

Model material technique, which requires only the small space of experimental set-up and low cost for experiment, is used to estimate the deformed profile and the forging load in rotary forging. The materials and working conditions are determined to satisfy the similitude conditions between the model test and the prototype test. The model material of the so-called plasticine and the mild steel are chosen as specimens, and they represent almost the same value of strain hardening exponent in the stress-strain relationship. Lubricant in the model test is also carefully selected so that it gives the same frictional conditions at the tool-specimen interface. Experiments for two kinds of specimens are carried out in each testing equipment at room temperature. From the experiments the deformed dimensions and the forging loads are measured and compared with each other by using the simulation coefficients. It is shown that there are good agreements between the model test and the prototype test. Finally, for verifying the availability of the model material technique this method is applied to forging of bevel gear product. The good result is obtained which can demonstrate that the model material technique is very efficient for estimating or developing a new process.

Key Words : Model Material Technique, Similarity, Rotary Forging, Bevel Gear Forging

1. 서 론

최근 단조기술이 발전해 감에 따라 절삭 가공되어 오던 부품들이 경제성이 높은 소

성가공으로 점점 전환되어 가고 있다. 여러 소성가공법중에 회전단조(rotary forging)는 종래의 단조에 비하여 성형하중이 1/5~1/10 정도로 낮기 때문에 최근 많은 주목을 받고 있다. 소재를 전면 압축하는 종래 단조법은 큰 하중을 필요로 하기 때문에 기계가 대형화되어 큰 설비투자가 요구되며, 또

*생산기술연구원

**서울산업대학 금형설계학과

한 소음과 진동 문제도 많이 발생되고 있다. 이에 반하여, 회전단조는 상형의 요동운동을 이용하여 소재의 일부분만을 반복가압하면서 제품을 성형하기 때문에 기계의 소형화가 가능하고 소음 진동의 문제도 쉽게 해결될 수 있다. (Fig. 1)

또한 회전단조법은 금형과 소재의 국부적 접촉에 의한 가공으로 인하여 금형과 소재의 마찰이 작기 때문에 가공한계가 향상될 수 있으며, 이러한 장점을 이용하면 현재의 일부 열간 가공제품을 냉간 가공으로 쉽게 대체할 수 있다. 따라서 본 공정은 비교적 금형이 작고 간단하며 자동화도 용이한 편이어서 생산 계획의 유연성 및 제품의 원가 절감과 품질향상에 크게 이바지할 수 있다.

Grzeskowiak⁽¹⁾의 조사에 의하면 600개의 단조품 중에 50%(회전대칭이 약 25%)가 회전단조로 전환이 가능한 것으로 나타났으나, 회전단조에 대한 연구 부족으로 인하여 일부 제품을 제외하고는 현재 널리 활용되지 못하고 있는 실정이다.

지금까지 회전단조에 대한 연구는 주로 환봉의 단순 업셋팅에 국한된 것으로 정적인 상태의 압입모드로 가정하거나,^(2,3) 또는 압연모드로 단순화시켜 하중과 변형기구를

간단히 해석하였으며,⁽⁴⁾ 최근에 들어서 압연과 단조를 동시에 고려하여 변형을 해석하고자 하는 연구가 발표되고 있다.⁽⁵⁾

본 연구는 소성가공 공정 설계시 중요시되고 있는 재료의 유동 및 변형 형상을 실험적으로 예측하기 위하여 수행되었으며, 최근 100톤급 회전단조기의 국내 개발과 함께 모델재 시뮬레이션 기술을 회전단조에 응용하고 회전단조의 변형 특성을 보다 쉽고 빠르게 예측하여 복잡한 제품의 회전단조 공정 설계에 유용한 자료로 사용하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 링형상(ring shape)의 모델 실험용(model test) 재료인 플라스틱인(plasticine)과 실제 실험용(prototype test) 재료인 연강을 사용하여 회전단조시 변형형상과 하중 등에 관한 상관관계를 규명함으로써, 앞으로 실제 제품 개발에 응용하고자 하는 모델 실험의 유용성을 조사하고자 한다. 또한 모델 실험의 유용성을 입증하기 위하여 자동차 차동장치 부품인 베벨기어(pinion mate)제품의 개발에 본 모델상사 기법을 적용하여 보았다.

2. 상사조건(Similitude condition)

모델 실험은 모델재의 변형과악이 쉽고 변형하중이 작아 비교적 적은 비용으로 유용한 자료를 얻을 수 있기 때문에 50년대초 Green⁽⁶⁾과 Cook⁽⁷⁾에 의해 시도된 이후 단조공정에 많이 응용되어 왔다.^(8,9) 이러한 모델 실험을 통하여 실제 공정을 정확히 예측하기 위하여서는 성형재와 모델재 사이에 엄격한 상사 조건을 유지해야 하며, 이를 위해서는 소재들의 변형 응력 관계, 마찰조건, 금형의 탄성변형 및 열적 평형 등을 고려하여야 한다.

2.1 응력-변형률 관계

소성 변형하는 동안 소재의 유동응력은 일반적으로 유효 변형률 속도($\dot{\epsilon}$), 유효 변

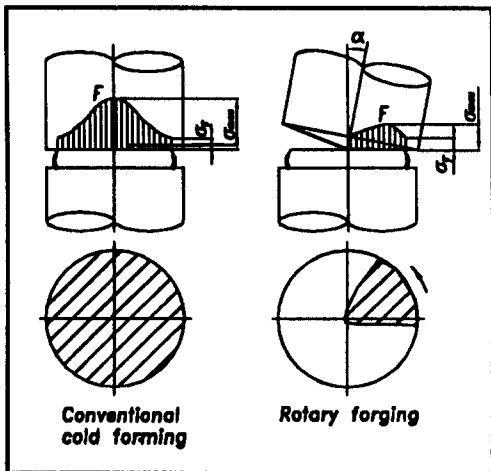


Fig. 1 Working principle of rotary forging process

Table 1 Stress-strain relationships of test materials

Material	Effective Stress (kgf/mm ²)	Ram Speed (mm/min)	Range of measured Strain	Remark
SM20C	$\bar{\sigma}=87.8 \bar{\epsilon}^{0.19}$	1	0.16 < ϵ < 0.8	compression test
Plasticine	$\bar{\sigma}=0.03 \bar{\epsilon}^{0.18}$	5	0.16 < ϵ < 0.8	
SM6C	$\bar{\sigma}=76.546 \bar{\epsilon}^{0.217}$	1	0.1 < ϵ < 1.0	bevel test
Plasticine	$\bar{\sigma}=0.029 \bar{\epsilon}^{0.218}$	1	0.1 < ϵ < 1.0	

형률($\bar{\epsilon}$)과 온도의 함수로 표시될 수 있는데, 본 연구에서 처럼 상온에서 실험하는 경우에는 변형도율에 의한 영향을 무시할 수 있고, 또한 일정한 온도의 주변환경에서 변형중의 소재 온도가 일정하다고 가정하면 응력은 단지 유효 변형률만의 함수로 간단히 표시할 수 있다. 따라서 이러한 가정하에서 실험재와 모델재의 유동응력 상사관계를 파악하기 위해 실험재는 $\phi 10 \times 10$ mm, 모델재는 $\phi 40 \times 30$ mm의 소재를 상온(18°C)에서 압축실험하였다. 압축실험은 만능시험기(Max. 25 Ton)에서 수행하였으며 응력-변형률 관계식은 최소자승법에 의한 곡선 맞춤(curve fitting)을 한 결과 Table 1과 같은 지수 함수 형태로 표시되었다.

2.2 마찰조건

금형과 소재 사이의 마찰조건은 재료의 변형패턴에 영향을 미치는 중요한 요소로 상사법칙이 적용되기 위해선 모델재 실험과 실제소재 실험에서 똑같은 마찰조건이 성립되어야 한다. 일반적으로 소성변형 해석에 사용되는 마찰 상수 m 은 다음과 같이 접선 응력 성분 τ 와 전단항복응력 k 의 비로 나타낼 수 있다.

$$\tau = mk$$

본 실험에서는 플라스틱인과 연강소재의 마찰조건을 맞추기 위하여 여러가지의 윤활제를 조합시키면서 링 압축실험을 한 결과,

연강 표면에 이황화 몰리브덴(MoS₂) 분말을 도표한 시편과 모델재(플라스틱인)에 테프론을 도표한 시편의 마찰조건이 잘 일치하는 것으로 나타났다. (Table 2 및 Fig. 2 참고)

Table 2 Friction factor determined from ring compression test

Material	Friction Factor	m
SM20C	MoS ₂	m=0.15
Plasticine	Teflon Spray	m=0.15

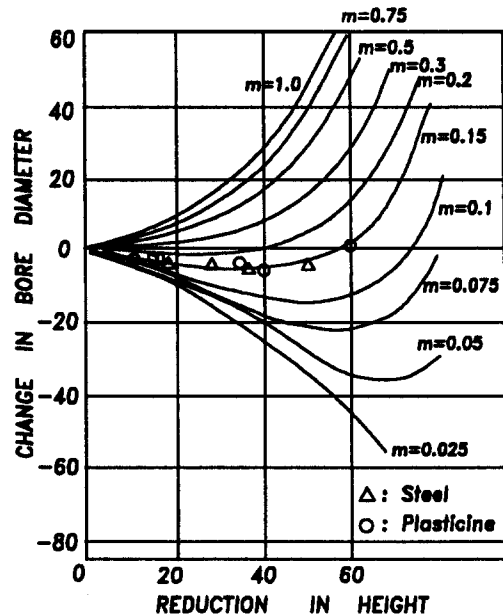


Fig. 2 Calibration curve for determining friction factor(m) from ring compression test

2.3 상사관계

연강소재와 모델재인 플라스틱인 소재 사이의 상사관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Q = K^x \cdot Q^x$$

여기서 Q 는 실제 실험에서의 변수이고, Q^x 는 모델 실험에서의 변수를 나타내고, 실제와 모델 실험사이의 비례 상수를 나타내는 상사 계수가 K^x 로서 각각의 변수들에 따라 서로 다른 값을 갖게 된다.

본 실험에 사용하고자 하는 실제 실험재인 연강소재(SM20C)와 모델재 플라스틱인 링 시편에 대한 시편 크기는 Table 3과 같이 준비하였으며, 이들로부터 길이의 상사계수 K 는 0.5임을 쉽게 알 수 있다. 또한 응력 상사 계수는 가공 경화 지수에 의한 변형을 계산값이 거의 같다고 가정하면 Table 1로부터 간단히 구할 수 있다.

$$K_\sigma = \frac{\bar{\sigma}_s}{\bar{\sigma}_p} = \frac{87.8 \bar{\epsilon}^{0.19}}{0.03 \epsilon_p^{0.18}} \approx 2927.0 \left(\frac{\bar{\epsilon}^{0.19}}{\epsilon_p^{0.18}} \approx 1 \right)$$

Table 3 Initial billet size of ring specimens used for rotary forging

(unit : mm)

Item	Height	Outer diameter	Inner diameter
Material			
SM20C	10.0	27.0	13.5
Plasticine	20.0	54.0	27.0

Table 4 Simulation coefficients calculated in rotary forging of ring specimens

Item	Simulation Coefficient				
	Length	Area	Speed	Stress	Load
Material	K_x	K_B	K_U	K_σ	K_F
SM20C	0.5	0.25	0.2	2927	732
Plasticine					

다른 상사 계수도 마찬가지로 방법으로 구하여 정리하면 Table 4와 같이 된다.

3. 링 회전단조 실험

모델 실험의 유용성을 조사하기 위하여 연강과 모델재의 링 회전단조 실험을 상온

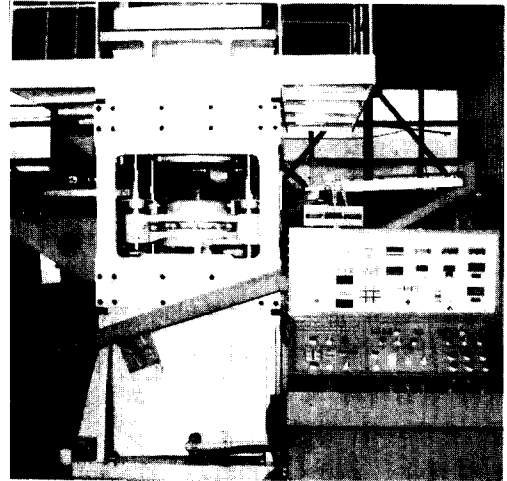


Fig. 3 Rotary forging machine(RF100) for prototype test

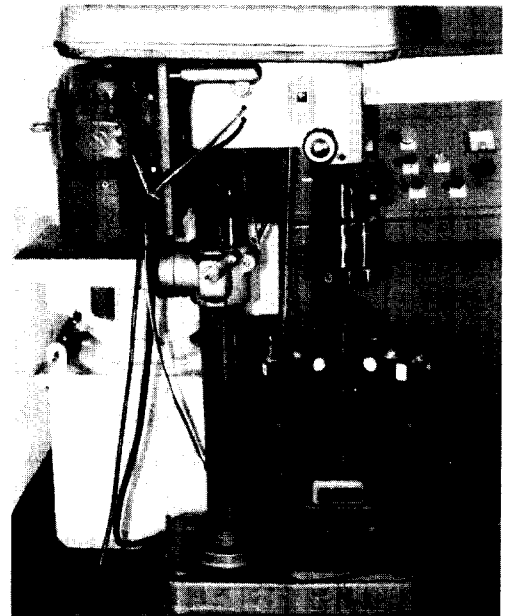


Fig. 4 Experimental set-up of rotary forging for model test

Table 5 Characteristic speeds of the upper and lower dies in rotary forging of ring specimens

	Oscillation of upper die (rev/min)	Upward speed of lower die (mm/rev)	Remark
SM20C	200	0.9	Prototype test
Plasticine	500	1.8	Model test

에서 수행하였다. 연강은 국내에서 자체 개발된 100 Ton급 회전단조기(RF 100)에서 실험을 수행하였으며 모델재는 드릴링 머신을 개조한 실험용 회전조기에서 각각 수행하였다. Fig. 3과 4는 각각의 실험장치를 보여주며, 실험에 사용된 금형의 재질은 합금공구강(STD11)이다. 모델 실험 장치와 실제 회전단조기는 모두 상부 금형의 요동각을 3°로 고정하여 일정하게 하였으며, 또한 상사 조건을 양측 모두 만족시키기 위하여 회전단조시 전체 면적에 대한 가압 면적의 비가 일정하도록 실험장치의 작업 조건을 선정하였다. (Table 5)

4. 링 회전단조 실험결과 및 토의

연강재(SM20C)와 플라스틱인 재료에 대해 각각의 상사 법칙에 맞는 작업 조건하에서 링 시편에 대한 회전단조 실험을 수행하였다. Fig. 5와 6은 높이 감소율에 대한 링 시편의 내경과 외경 변화를 보여주고 있다. 그림으로부터 연강재와 모델재의 실험결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 또한 내·외경의 변화를 포함한 전체 변형 형상이 거의 비슷함을 확인할 수 있었다.

Table 6은 단조하중에 관한 결과를 나타낸 것으로 모델실험으로부터의 하중과 상사 이론으로부터의 하중 상사 계수를 곱한 것이 단조 예측 하중이고, 프로토타입의 회전단조 실험시 측정된 하중이 실제 하중을 나타낸다. 예측 하중과 실제 하중의 경향이

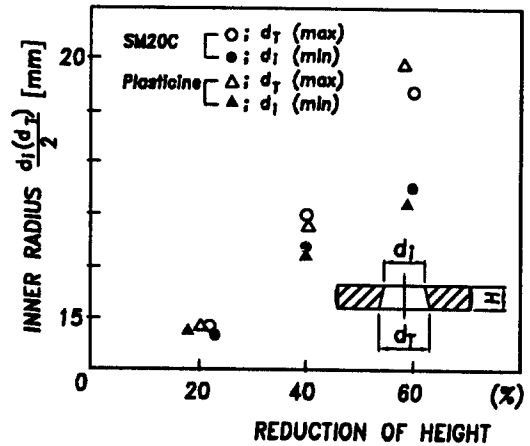


Fig. 5 Comparison of deformed inner diameters in rotary forging of ring specimens(SM20C, Plasticine)

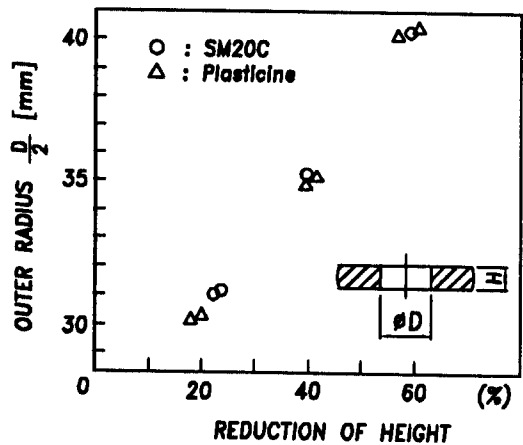


Fig. 6 Comparison of deformed outer diameters in rotary forging of ring specimens(SM20C, Plasticine)

Table 6 Comparison of the predicted and the actual loads in rotary forging of ring specimens

Reduction of height (%)	Predicted load (Ton)	Actual load measured from prototype test (Ton)
24	5.2	4.12
40	8.3	6.08
60	11.3	8.48

매우 잘 일치하고 있으나, 예측 하중이 높
이 감소율에 따라 약 20% 정도 높은 값을
보여준다. 이와같은 차이는 상사조건을 구
하는 과정에서의 실험적인 오차 및 금형재
의 탄성변형을 고려하지 않는 때문인 것으
로 사료된다. 따라서 향후 금형재의 탄성
변형을 고려한 상사조건의 보완이 이루어진
다면 보다 하중예측이 가능할 것으로 사료
되며, 이에 대한 지속적인 연구가 수행될
예정이다.

5. 베벨기어 응용 실험

모델 실험의 타당성을 입증하고 유용성을
검증하기 위하여 실제 자동차용 차동장치
부품인 베벨기어 제품의 제원은 Table 7에
나타나 있으며, 베벨기어의 재질은 SM6C
이고, 모델재는 앞서 실험에 사용한 플라
스티신이며, Fig. 7은 모델재와 연강소재의
원소재 형상을 보여주고 있다.

베벨기어 제품개발에 사용된 모델재(플라
스티신)와 연강소재(SM6C) 사이의 상사관
계는 2절에서와 같은 방법으로 구하였으며,
Table 1과 Table 8은 실험을 통하여 얻은
이들 소재들 사이의 하중곡선식과 상사계수
들의 값을 나타낸다.

실험장치 및 제반 작업조건은 앞의 링 회
전단조 실험과 동일하게 수행하였으며, 상
부금형의 회전수를 350 rpm으로 고정시키
고, 하부금형의 가압속도를 조절하여 상부
금형 1회전당 성형속도를 0.5~2(mm/rev)
범위에서 수행하였다.

두 소재 사이의 변형패턴은 링 회전단조
실험에서 입증된 바와 같이 매우 유사하였
으며, 따라서 Fig. 7과 같은 성형 가능한
원소재 형상을 구하는데 소요되는 시간을
상당히 단축할 수 있었다.

Fig. 8은 단조하중에 대한 결과를 나타낸
것으로 단조 속도에 따른 성형 하중의 변화
를 보여주고 있다. 본 실험에서는 실제 실험

Table 7 Dimentions of straight bevel gear(Pinion mate)

Straight Bevel Gear	
Module	5.016
Pressure angle(degree)	22°30"
Number of teeth(EA)	10
Pitch diameter(mm)	∅51.06
Tooth width(mm)	10.77
Addendum angle(degree)	6°0'36"
Dedendum angle(degree)	4°46'36"
Pinch angle(degree)	35°32"
Root angle(degree)	28°20"

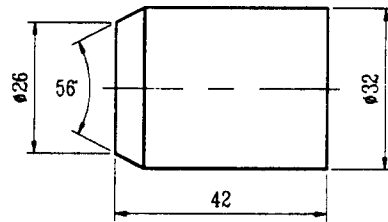


Fig. 7 Initial shape of the optimized specimen for rotary forging of bevel gear

Table 8 Simulation coefficients calculated in rotary forging of bevel gears

Item	Simulation Coefficient				
	Length	Area	Speed	Stress	Load
Material	K _x	K _B	K _U	K _σ	K _F
SM6C	1	1	1	2600	2600
Plasticine					

험에 사용한 100 Ton급(RF 100)회전 단조
기가 최대하중이 약 120 Ton이기 때문에
단조속도가 1.2(mm/rev) 이상에서의 실제
성형하중은 비교할 수 없었다. 예측하중이
실제 하중보다 링 회전단조 실험에서와 같
이 약 20% 정도 높은 것으로 나타나 있으
나, 단조 속도에 따른 하중 변화 경향은 매
우 잘 일치하고 있다.

Fig. 9는 회전단조한 베벨기어의 형상을 보여주며, 그림에서 상부는 모델재이고 하부는 연강소재를 성형시킨 제품이다. 모델재 실험 결과와 실제 실험 사이의 변형 형상이 거의 유사한 것을 보여준다.

본 베벨기어 실험을 통하여 모델재 상사기법을 실제 제품개발에 적용시켜 본 결과, 성형 최적조건 예측이 매우 용이하였으며, 제품개발에 소요되는 시간과 경비를 크게 절감시킬 수 있었으며, 따라서 본 모델재

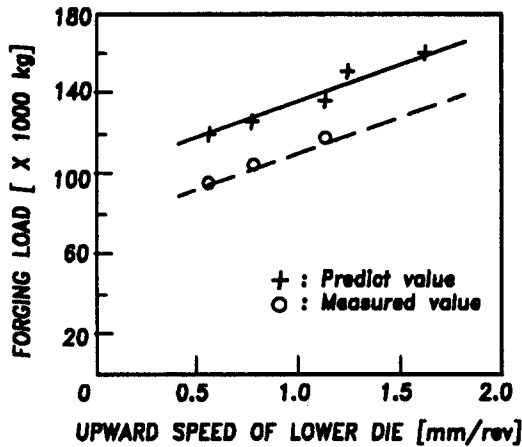


Fig. 8 Comparison between the actual and predicted loads in rotary forging of SM6C bevel gear

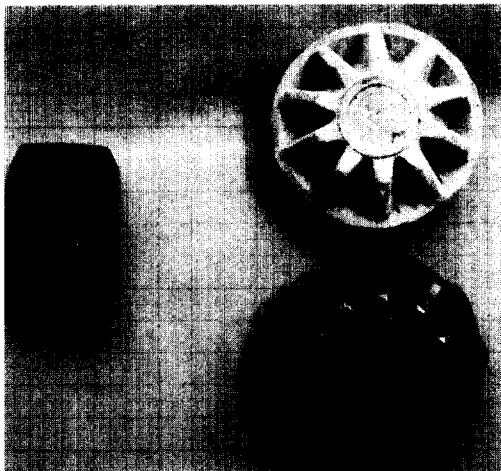


Fig. 9 Examples of bevel gear produced by rotary forging(upper : plasticine, lower : SM6C)

상사기법의 유용성을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

회전단조공정에 있어서 소재의 변형 형상과 단조하중을 쉽게 예측하기 위하여 모델재 상사기법을 이용한 실험연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모델재와 실험재 사이의 응력-변형률 관계와 마찰조건에 대한 상사조건을 만족시킨 상태에서 소재의 변형 형상을 비교적 정밀하게 예측할 수 있었다.

(2) 단조하중의 예측도 안전을 고려한 상계해로서 비교적 정확하게 예측할 수 있었으나, 향후 금형재의 탄성 변형에 대한 상사조건을 고려한다면 보다 정확한 하중 예측이 가능할 것이다.

(3) 모델 상사기법을 상용제품 개발에 적용시킬 경우 성형 최적조건을 보다 용이하게 파악할 수 있기 때문에 제품 개발에 소요되는 시간과 경비를 대폭 절감시킬 수 있었으며, 실제로 자동차 차동장치 부품인 베벨기어 성형에 적용시킨 결과 만족스러운 결과를 얻었다.

(4) 따라서 본 연구에서 수행한 모델재 상사기법은 회전단조 공정 뿐만 아니라 다른 소성가공 공정에서의 복잡한 형상제품 개발시 하중 및 변형형상의 예측을 통한 공정개발에 매우 유용하게 응용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Grzeskowiak, J., 1984, "Whether In the Coming Years the Rocking Die Forming Can Be Widely Applied In the Forging Manufacture?," Pro. 3rd. Int. Conf. on RoMP, IFS Ltd, UK & North Holland, pp. 109~113.
- (2) Stranding, P. M., Moon, J. R. and Apleton, E., 1980, "The Plastic Deforma-

- tion Produced During the InDentation Phase of Rotary Forging," *Metals Technology*, Vol 7, Part 4, pp. 159~168.
- (3) Hawkyard, J. B., Yunus, N. M. and Gurnani, C. K. S., 1979, "Prediction of Force In the Rotary Forging of Short Circular Cylinder," *Proc. 1st. Int. Conf. on RoMP*, pp. 111~12.
- (4) Zhang Meng, 1984, "Caclulating Force and Energy During Rotating Forging," *Proc. 3rd Int. Conf. on RoMP*, pp. 115~124.
- (5) Su, H. X., Kawai, K. I. and Hayama, M., 1989, "An Analytical Study On Deformation Mechanism In Rotary Forging Process," *J. of the JSTP*, Vol. 330, No. 336, pp. 123~129.
- (6) Green, A. P., 1951, "The Use of Plasticine Models to Simulation the Plastic Flow of Metals," *Phil. Mag.*, April, pp. 365.
- (7) Cook, P. M., 1953, "Forging Research : Use of Plasticine Models," *Metal Treatment and Drop Forging*. Nov., pp. 541.
- (8) Danckert, J. and Wanheim, T., 1977, "Model-Material Technique Applied In the Analysis of the Forging of A Specimen of Complicated Shape," *Scandinavian J. of Metallurgy*, 6, pp. 185~190.
- (9) 임용택, 1992, "모델링 진흙을 이용한 단조성형 모사실험," *한국소성가공학회지*, 제1권 제1호, pp. 5~10.