

## 금형면 마찰조건을 달리한 스플라인 단조에 관한 연구

김관우\* · 이석진\*\* · 김문기\* · 조성열\* · 조해용†

(원고접수일 : 2008년 12월 3일, 원고수정일 : 2009년 3월 24일, 심사완료일 : 2009년 3월 27일)

### The Study for Cold Forging of Spline with Different Friction Factor on Die Surface

Kwan-Woo Kim\* · Seok-Jin Lee\*\* · Moon-Ki Kim\* · Seong-Yeol Cho\* and Hae Yong Cho†

**Abstract :** Forging of square spline was investigated by using finite element methods in this study. Spline is widely used by torque transmitter in the fields of automobile, aircraft, and shipping etc. Friction on the surface of die is regarded as the most important factor to improve the dimensional accuracy for complete forming of spline teeth. Finite element simulation was carried out to improve the formability of the spline, especially remove unnecessary burrs which were extruded in gap between the die and the punch. To remove the burrs, various friction factors are considered on the surfaces of the die in the simulations and punch flat surface was designed. The simulated results were compared with experimental ones.

As a results, it is possible to control the growth of burrs and improve formability of spline teeth by applying various friction factors and design of punch flat surface.

**Key words :** Cold-forging(냉간단조), Finite element analysis(유한요소해석), Forging process (단조공정), Multi-stage forging(다단단조)

#### 1. 서 론

스플라인은 치형에 따라 각형 스플라인, 인벌류우트 스플라인 및 세레이션 등이 있으며, 가공법은 호빙, 웨이빙 등의 절삭가공법이 많이 사용된다. 그러나 최근 제품의 정밀성과 대량생산화를 지향함에 따라 소성가공에 의한 성형법 개발과, 성형공정의 문제해결에 대한 해석적 방법의 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Cho 등<sup>[1]</sup>은 동적가용 속도장을 유도하여 중공 및 중실소재의 스플라인 단조를 상계해석 하였고, Wang 등<sup>[2]</sup>은 중공축 내접 스플라인을 성형하기 위한 냉간압출공정에서 금형이 소재와의 접촉부분의 길이를 다르게 하는 두가지 공정을 제시하여 성형 하중 및 최종형상을 비교 하였다. Jang 등<sup>[3]</sup>은 강소성 축대칭 변형체인 구와 중실축 재료에 쿨롱 마찰계수를 적용하여 접촉문제에 대한 유한요소해석을 하였고, Lee 등<sup>[4]</sup>은 냉간단조에 의한 스피어

† 교신저자(충북대학교 기계공학부/중전기기 미래기술개발 연구센터), E-mail:hycho@cbnu.ac.kr, Tel: 043)261-2464

\* 충북대학원 정밀기계과

\*\* 제주항공 정비본부

기어 단조 시 금형의 치수정밀도를 변화시킨 실험을 수행하여 단조기어의 정밀도와 금형의 치수정밀도와의 상관관계를 규명하고자 하였다. 그 외에도 단조품의 성형성 및 치수정밀도를 향상시키기 위한 연구가 폭넓게 이루어지고 있다<sup>[5][6]</sup>.

그러나 지금까지의 연구는 성형성을 향상시키기 위해 열처리 조건을 찾거나 제품성형 시 금형의 치형 정밀도에 대한 연구가 많았다. 특히 금형의 마찰에 관한 연구는 마찰력을 금형전체에 동일하게 적용시킨 것이 대부분이었으며, 금형의 일부분에 마찰력을 다르게 적용하여 소재의 유동을 제어함으로써 성형성을 향상시키는 연구는 아직 미비한 상태이다. 따라서 본 논문에서는 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 금형의 마찰상수 차등적용과 형상변경 방법으로 소재의 유동을 제어함으로써 치수정밀도 향상 및 불필요한 버의 성장을 억제시키하고자 하였다.

## 2. 냉간 단조공정 설계

Fig. 1은 스플라인 단조제품의 최종 형상을 나타낸 것이고, Fig. 2는 제품생산을 위해 설계된 총 5단계 공정을 도식적으로 설명한 것이고, 초기 소재는 각 공정에서 Fig. 3과 같은 성형과정을 통해 마지막 5단계에서 양단에 스플라인인 최종제품으로 성형된다. Fig. 2의 1, 2단계에서 상부의 펀치와 하부 핀 사이의 밀폐된 금형 속에 위치한 소재를 성형하고 3단계에서 소재 끝이 금형 밖으로 돌출된 상태로 자유단조하여 Fig. 3의 3번째 스플라인 예비성형 소재를 얻었다. 4, 5단계 성형을 통하여 Fig. 3의 5번째 그림인 양단에 스플라인이 형성된 제품을 얻을 수 있다.

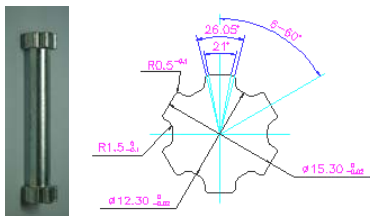


Fig. 1 Final shape of forged spline

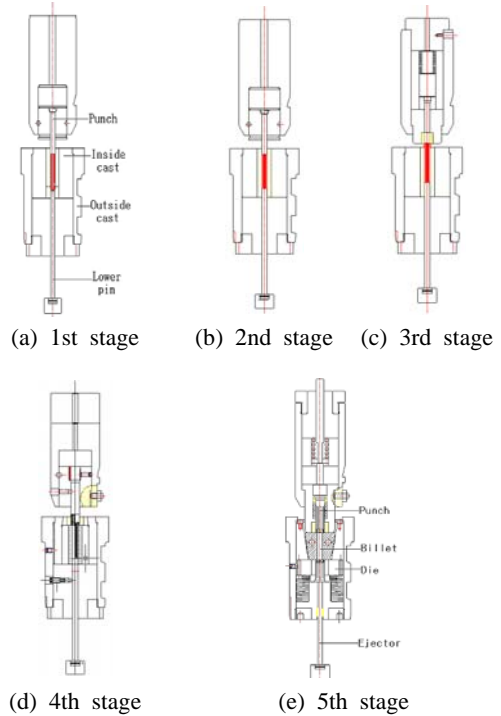


Fig. 2 Schematic description of a forging process

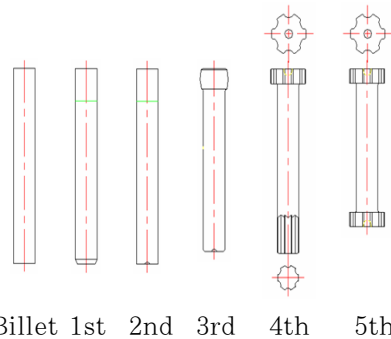


Fig. 3 Product at each step of forging process

## 3. 유한요소 해석 및 실험

Pro/ENGINEER를 사용하여 실제 금형과 소재를 3D 모델링을 하고 이 모델을 DEFORM-3D에 적용하여 성형해석을 하였다. 또한 해석결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 동일조건 단조실험을 하였다.

3.1 유한요소해석 모델링 및 해석조건

3.1.1 해석을 위한 모델링

Fig. 4는 Pro/ENGINEER를 사용하여 모델링 한 금형의 각 부품 및 펀치를 나타낸 것이다. 소재, 금형 등의 대칭성을 고려하여 해석시간 단축을 위해 1/4 모델을 적용하여 단조 시뮬레이션 하였다. Fig. 4(a)는 로우 핀으로 Fig. 2의 금형 하단 중앙에 위치하고 펀치에 의해 압축 시 소재가 내려가는 것을 방지하는 역할을 한다. Fig. 4(b),(d)는 인사이드 캐스트, 아웃사이드 캐스트를 나타낸 것이다. 아웃사이드 캐스트는 인사이드 캐스트의 외부에서 보강대 역할을 하고, 인사이드 캐스트 내의 금형으로 기본 소재가 최종 제품형상으로 성형된다. 소재 단조 시 금형 내면에 작용하는 성형 압으로 인해 금형은 큰 인장력을 받게 된다. 따라서 충분한 금형수명 확보를 위해서 이를 분산시킬 수 있는 인사이드, 아웃사이드 캐스트의 역할이 중요하며 적절한 설계, 장착이 필요하다. Fig. 4(c)는 펀치로 소재를 압축시킨다. Fig. 4(e)는 스플라인을 형성시키는 금형을 나타낸 것이다. Fig. 2 (d), (e)의 4, 5단계에서 사용된다.

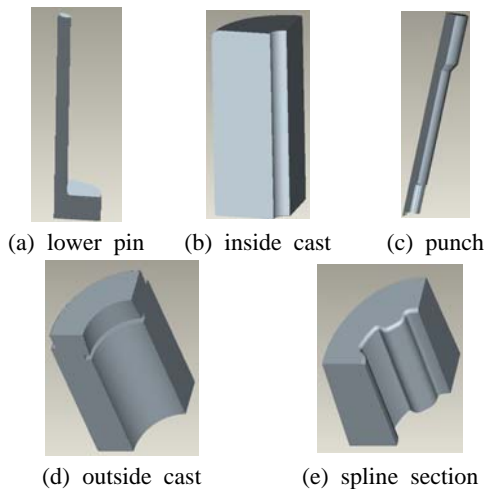


Fig. 4 Shape of die partition by axis symmetry

Fig. 5(a)는 Fig. 4(e)의 전체 모델을 나타낸 것이다. 이는 성형 시 소재와 접촉되는 금형 내면의 마찰상수를 차등 적용시키기 위한 것으로 이를 통해 금속유동을 제어하고자 하였다. Fig. 5(b)는

소재와 가장 먼저 닿는 돌출된 면을 나타낸 것으로 0.08~0.2의 마찰상수를 변화시키면서 적용하였다. Fig. 5(c)는 뒤이어 닿게 되는 안쪽 면을 나타낸 것으로 0.08의 일정한 마찰 상수를 적용시켰다.

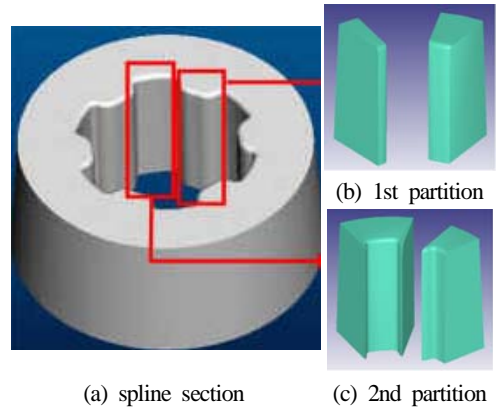


Fig. 5 Modeling of die to apply different friction factor

3.1.2 해석의 경계조건 및 재료 물성치

유한요소 해석 시 실제 가공조건에 대한 경계조건과 재료 물성 값들은 해석결과에 큰 영향을 미친다. 따라서 보다 정확한 성형결과 예측을 위해서 최대한 실제와 같게 조건과 값을 적용하는 것이 매우 중요하다. 해석경계조건으로 단조작업 온도는 70℃이고, 마찰계수는 0.08~0.2로 차등 적용시켰으며, 펀치속도는 600 mm/s이다. 해석의 차등 마찰계수 조건에 대한 실험의 적용은 연마를 통해 금형 표면 조도를 달리하는 방법을 사용하였다.

단조소재는 전·연성이 좋은 연강인 AISI 1006 이고 금형 및 펀치는 내마모성, 내 충격성을 갖는 AISI H13을 사용하였다. 소재 및 금형과 펀치재질의 물리적 특성을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties

Properties	AISI 1006	AISI H13
Hardness(HV)	98	180
Ultimate tensile strength(MPa)	330	1420
Modulus of elasticity(GPa)	205	140
Density(g/cc)	7.87	7.58
Yield tensile strength(MPa)	285	1280
Poisson's ratio	0.29	0.29

3.2 공정 및 금형 설계변경

3.2.1 금형전체 동일 마찰상수 적용에 따른 해석 소재와 접촉되는 금형 및 펀치부분의 마찰상수를 0.08로 모두 동일하게 고려하여 단조해석을 하였다. 해석결과 파일은 데이터베이스 파일로써 재료의 변형률, 발생응력, 성형 시 요구되는 펀치 하중, 재료가 금형에 가하는 압ma력 등의 정보를 포함한다. 이를 각각의 마찰조건에 대한 경우와 비교분석하여 스플라인 끝단에 버 발생을 최대한 억제시킬 수 있는 가공조건 설정을 하고자 하였다.

3.2.2 금형 마찰상수 차등적용에 따른 해석

Fig. 6은 각 마찰상수를 차등 적용한 것을 나타낸 것으로 스플라인 금형의 들어간 면의 마찰상수는 0.08로 동일하게 적용시켰다. 그리고 돌출 면의 마찰상수를 0.08~0.2로 적용시켰고 그에 따른 끝단의 버 발생량 정도를 비교분석하여 금형의 차등 마찰상수 값 적용의 영향을 파악하고 적정 마찰계수 값 범위를 설정 하고자 하였다.

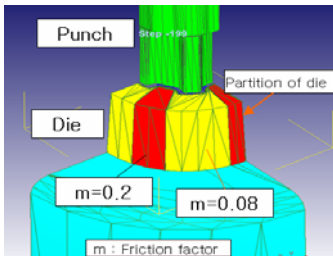


Fig. 6 Applications of different friction factors

3.2.3 펀치의 형상변경에 따른 해석

Fig. 7(a)~(d)는 펀치 바닥면의 형상변경 조건을 나타낸 것으로 반원형 돌기를 일정한 간격으로 한 개씩 증가시켜 본 것이다. 돌기의 개수에 따라 성형 시 소재와 펀치의 접촉 면적이 달라짐으로 소재유동에 끼치는 영향 정도에 차이가 있게 된다. 이점을 이용하여 성형 시 생성되는 버를 감소시키고자 하였다. 위에 서술한 바와 같이 접촉 면적을 증가시키는 방법으로 양각 돌기를 사용하였고 돌기는 반원형으로서 직경은 0.5mm이고 축을 중심으로 일정한 거리에 위치하며 1~4개까지를 해석과 실험에 적용하였다. 이때 돌기 개수에 따른 영향을

파악하기 위해 스플라인 금형의 마찰상수는 0.08로 동일하게 적용하였다. 표면돌기를 갖는 펀치를 이용하여 3.2.1절, 3.2.2절과 동일조건인 유한요소해석을 하고 그 결과를 비교분석하였고 적정 펀치 형상을 제시하고자 하였다.

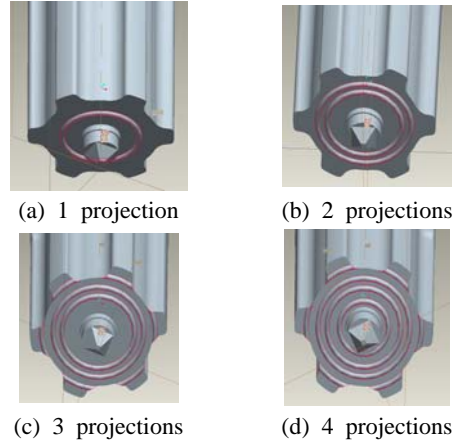


Fig. 7 Shapes of punches

3.3 단조실험 방법

스플라인 금형면의 마찰조건, 펀치면의 돌기 형상에 따른 단조품 성형 해석과 동일조건인 실험을

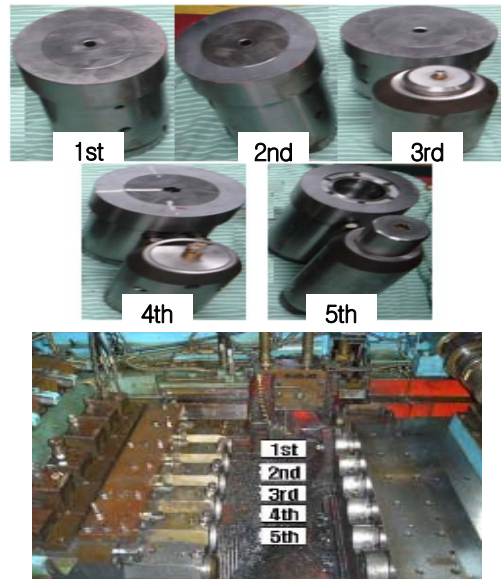


Fig. 8 Press machine

하였고 그 결과를 비교분석 하였다. Fig. 8은 실험에 사용된 다단 포머 단조공정 실험을 위한 프레스와 각 공정에 사용되는 금형들을 나타낸 것이다. 다단 포머의 최대 성형압력은 285ton이고 금형 및 펀치의 형상, 램 속도 및 소재는 해석과 동일하다. 단 금형의 마찰에서 유한요소 해석의 마찰상수는  $0.08 \rightarrow 0.1 \rightarrow 0.12 \rightarrow 0.2$ 로 차등적용이 가능하였으나, 실제 단조 실험에서는 단조순간 금형의 마찰상수 측정이 불가능하여 표면의 조도를 변화시키는 방법을 사용하였다. 단조성형 후 스플라인에서의 버 발생량, 하단부 성형성을 비교분석하였다.

#### 4. 유한요소 해석 결과

금형전체에 동일 마찰상수 및 차등 마찰상수, 펀치면 형상변경 등을 적용하여 단조 시뮬레이션을 하고 그 결과들을 비교분석하여 버 발생 억제를 위한 조건을 제시하고자 하였다.

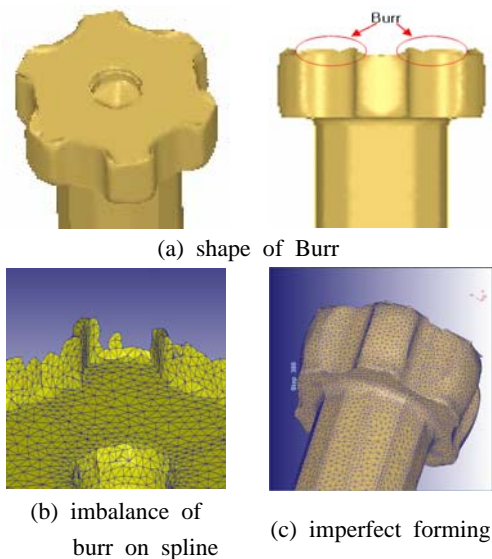


Fig. 9 Burr on spline surface after final step

Fig. 9(a)는 금형 전체에 동일 마찰상수 적용에 따른 유한요소 해석결과를 나타낸 것이고 분석결과 다음과 같은 문제발생이 예측되었다. 하단부가 미성형된 상태에서 스플라인 기초원 부분과 금형이

먼저 접촉됨으로써 상단부의 성형압력이 증가하였다. 따라서 상대적으로 압력이 낮은 금형과 펀치 사이로 버가 발생되었다. 버가 스플라인의 모든 부분에서 균일하게 성장한다면 소재의 체적을 조절하여 버 발생 양을 조절할 수 있다. 그러나 Fig. 9(b)와 같이 스플라인의 기초원과 이 끝부분에 불균일 버가 발생됨으로 소재의 체적 조절만으로 문제해결이 될 수 없음을 알 수 있다. Fig. 9(c)는 버 발생으로 인한 하단부 소재의 미성형을 나타낸 것으로 이와 같은 제품은 기능상 문제가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10은 금형의 마찰상수 차등 적용에 따른 유한요소 해석결과를 나타낸 것으로 스플라인 금형의 돌출 면 마찰상수를  $0.08 \sim 0.20$ 으로 차등 적용시킨 결과이다. Fig. 10(a)는 마찰상수 0.08인 경우로 가장 과도하게 버가 성장되었다. 또한 성형성 저하 및 하단부가 완전히 성형되지 않은 상태에서 버가 성장됨을 볼 수 있다.

Fig. 10(b)는 마찰상수 0.1인 경우로 0.08일 때와 비교했을 때 버 발생량이 감소함을 볼 수 있다. 감소된 버의 체적 만큼 하단부의 성형성은 향상되었지만 마찬가지로 하단부가 완전히 성형되기 전 버가 발생되었다. Fig. 10(c)는 마찰상수 0.12인 경우로 0.1에서 보다 버 발생량 감소, 하단부 성형성 향상이 확인되었고 특히 하단부가 완전히 성형된 후에 버가 발생하였다. Fig. 10(d)는 마찰상수 0.2에 대한 해석 결과로 0.12일 때보다 버 발생, 하단부 성형 측면이 많이 개선되었고 하단부가 완전히 성형된 후에 버가 발생되었음을 알 수 있었다. 따라서 스플라인 성형을 위한 금형의 돌출부 마찰상수 차등적용은 소재의 유동제어에 효과적인 방법으로서 성형성 향상 및 불필요한 버 생성억제에 효과적일 것으로 판단된다.

소재와 금형의 접촉면 마찰력을 증가시키는 방법으로 펀치가 소재와 접촉되는 부분의 면적을 증가시켜 해석에 적용하였다. Fig. 7에서와 같이 반지름 0.25mm의 돌기를 1~4개까지 고려해 보았고 마찰상수는 기존의 해석결과와 비교하기 위하여 0.08을 적용하였다. Fig. 11은 이에 대한 해석결과로 돌기가 1개일 때 성형성이 가장 많이 향상됨

을 볼 수 있다. 돌기가 2개 이상일 때 성형성이 저하된 것은 과도한 마찰력으로 소재의 유동성이 저하됐기 때문으로 판단된다. 따라서 금형과 펀치의 적절한 마찰제어는 버의 발생을 억제하고 성형성을 향상시키지만 과도한 마찰력은 성형성 저하의 원인이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

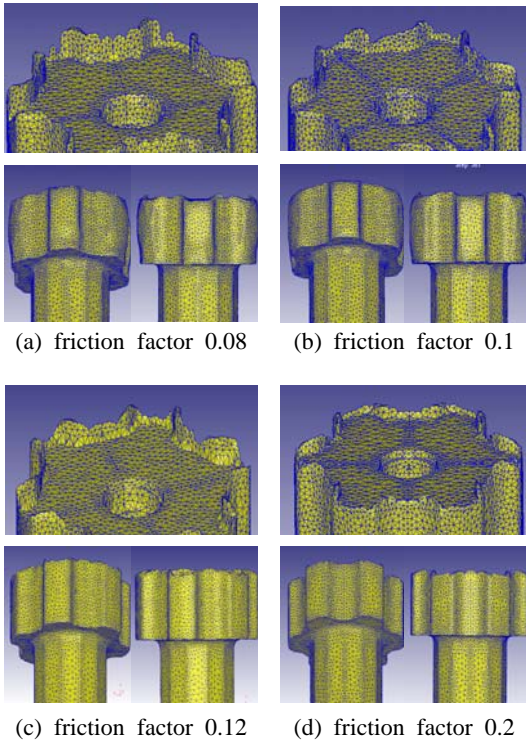


Fig. 10 Results of different friction factors on die surface

앞서 서술한 결과들에서 버 생성억제에 효과적인 조건을 다음과 같이 중복 적용시켜 보았다. 즉 스플라인 금형 돌출부 마찰상수 0.2, 펀치면 돌기 1개를 해석에 적용시켰고, Fig. 12는 그 성형 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 12를 Fig. 10 및 11과 비교해 보면 가장 향상된 성형성을 확인할 수 있었고 버의 성장도 균형적으로 감소하였음을 볼 수 있다. 따라서 버 생성 억제를 위한 가공조건 설정에 있어서 금형 및 펀치의 적절한 마찰제어가 큰 효과가 있음을 해석적 방법을 통해 알 수 있었고, 특히 펀치의 적절한 형상을 제시할 수 있었다.

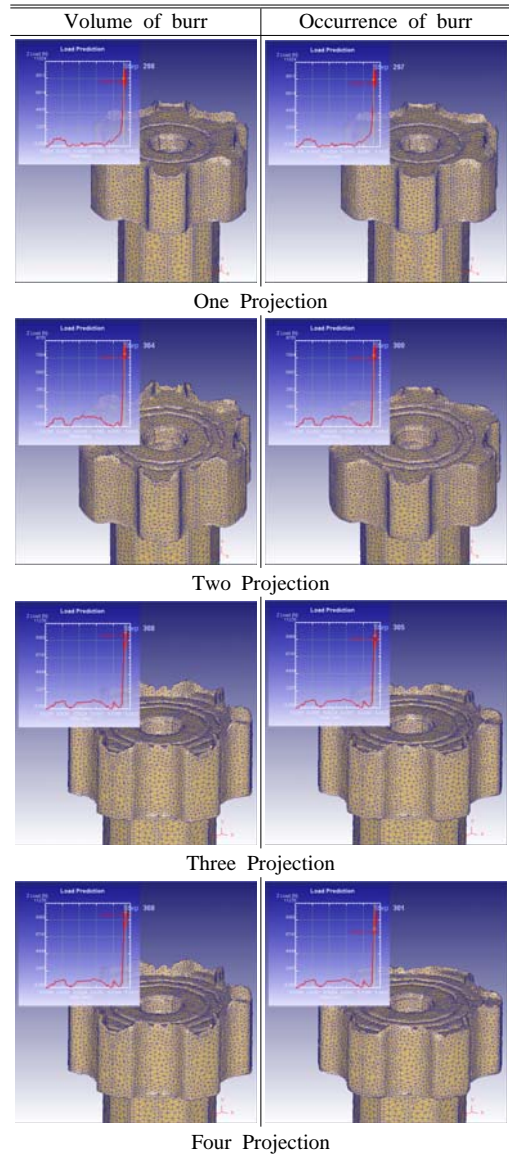


Fig. 11 Results by punch shape changes

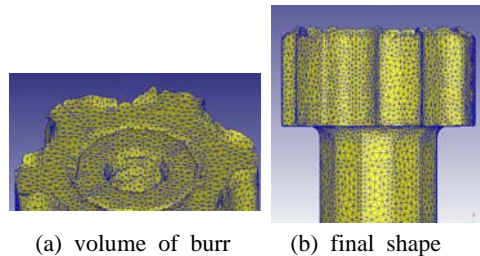


Fig. 12 Result of condition at friction factor 0.2, one projection on punch surface

### 5. 단조 실험결과

유한요소 해석의 결과와 성형성 향상을 위해 제시한 방법의 검증을 위해 동일조건 단조실험을 하고 그 결과를 비교, 분석하였다.

소재는 AISI 1006, 금형 및 펀치는 AISI H13 을 사용하여 해석과 동일한 치수와 형상으로 제작하였다. 실험결과와 측정치는 Fig. 13과 같이 마이크로미터를 이용하였고 총 6개의 치형 부분 중 버가 발생된 부분과 발생하지 않은 부분의 높이를 측정하여 평균값을 구하였다. Table 2는 앞의 실험결과를 정리하여 나타낸 것이다. 3회의 동일조건 실험에서 해석을 통해 제시된 금형 마찰상수 0.2, 펀치 돌기 1개인 조건이 버 발생억제에 가장 유리함을 확인 할 수 있었다.

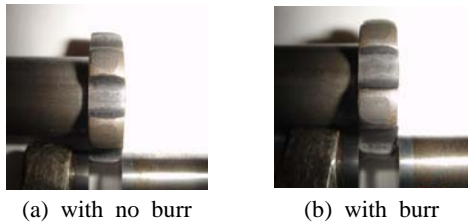


Fig. 13 Measurements of burr by a micrometer

Table 2 Results of experiments

(a) first experiment

Factor of friction	No. of projection	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	Average
0.08	0	0.65	0.55	0.51	0.60	0.60	0.65	0.59
0.2	0	0.31	0.25	0.25	0.26	0.24	0.27	0.26
0.08	1	0.18	0.14	0.16	0.15	0.18	0.13	0.15
0.2	1	0.13	0.15	0.15	0.14	0.14	0.15	0.14

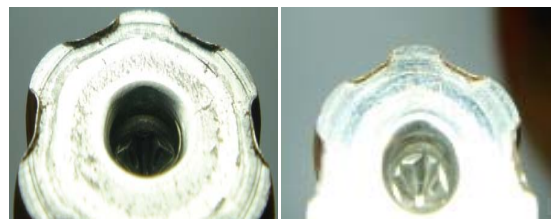
(b) second experiment

Factor of friction	No. of projection	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	Average
0.08	0	0.55	0.58	0.59	0.54	0.57	0.61	0.57
0.2	0	0.28	0.24	0.26	0.24	0.24	0.26	0.25
0.08	1	0.16	0.15	0.17	0.18	0.18	0.13	0.16
0.2	1	0.13	0.14	0.14	0.15	0.14	0.16	0.14

(c) third experiment

Factor of friction	No. of projection	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	Average
0.08	0	0.58	0.54	0.58	0.57	0.56	0.57	0.56
0.2	0	0.27	0.25	0.27	0.25	0.24	0.25	0.25
0.08	1	0.15	0.15	0.17	0.16	0.17	0.14	0.15
0.2	1	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.15	0.14

Fig. 14는 각 공정별 성형 결과를 나타낸 것으로 Fig. 14(a)는 금형전체에 대하여 마찰상수를 0.08로 동일하게 적용시킨 결과이다. 스플라인의 치형 끝 부분에서는 버가 전혀 발생하지 않은 것에 비하여 기초원 부분에서의 버 발생량은 0.59mm, 0.57mm, 0.56mm로 평균 0.57mm 성장하였다. 이것은 금형전체에 동일하게 적용된 마찰상수가 소재 유동을 제어하지 못했다는 것과 소재와 금형이 접촉되는 순서, 버의 체적만큼 하단부의 성형성이 저하된 현상으로 판단된다.



(a) friction factor of 0.08 (b) friction factor of 0.2 on die surface



(c) one projection on punch (d) change of punch shape & Friction Factor

Fig. 14 Results of experiments for spline forming

Fig. 14(b)는 금형 일부분에 마찰상수를 차등 적용하여 얻은 실험결과를 나타낸 것이다. 유한요소 해석에서는 마찰상수를 0.1~0.2까지 차등 적용시킬 수 있지만, 실제 금형 표면의 마찰상수 측정은 불가능하므로 연삭을 통해 표면조도를 변화시켰다. 실험결과 버의 성장량은 평균 0.25mm로 금형면에 동일한 마찰상수를 적용시킨 경우보다 평균적으로 약 0.32mm 감소하였다. 또한 하단부 성형성이 해석결과와 동일하게 향상되었으나, 해석에서 완전 성형된 것에 비해 성형성이 약간 저하된 것을 확인할 수 있었다. 이는 단조과정에서 소재의 금형 내 안착, 윤활 등에 따른 문제로 판단된다.

Fig. 14(c)는 펀치 형상을 변경하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 돌기가 1개일 때 버의 성장량이 가장 적고 하단부의 성형성도 좋았고, 2~4개로 돌기 수가 증가할수록 버의 성장시점이 빨라지고 성장량도 증가했으며 성형성도 저하되었다. 따라서 성형성이 가장 많이 향상된 돌기 1개 때의 결과를 확인해 보면 버의 성장량은 평균 0.15mm로 차등 마찰조건만을 적용시킨 경우보다 평균적으로 약 0.1mm정도 버 생성을 억제시킬 수 있었다. 또한 버 발생의 원인 측면에서 스플라인 상단부 축과 직교하는 표면에서의 유동제어가 버 발생에 미치는 영향이 큼을 확인할 수 있다.

Fig. 14(d)는 펀치의 형상변경 및 금형 일부부에 마찰상수를 차등 적용하는 방법을 동시에 적용한 결과로 금형 마찰상수 0.2, 펀치 돌기 1개일 경우를 나타낸 것이다. 검토된 가공조건 중 가장 좋은 성형결과를 볼 수 있었고 버의 성장도 균형적이며 크기도 평균 0.14mm로 가장 작았다. 펀치 형상 변경 시보다 0.01mm의 버 발생감소가 확인되었고 하단부가 완전히 성형되었다.

검토된 모든 조건에서 유한요소 해석과 동일한 결과를 확인할 수 있었고 성형성 향상 및 버 발생을 억제시키기 위해서는 스플라인 금형 돌출부 마찰상수 0.2, 펀치면 돌기 1개의 성형조건이 가장 적절하다고 판단된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 사용하여 스플라인 단조성형에 관한 시뮬레이션을 하였다. 해석 및 실험을 통한 스플라인 단조성형 결과를 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단조해석에서 금형면의 일부부에 마찰상수를 0.08부터 0.2까지 차등 적용한 결과, 전체에 대하여 동일한 마찰상수 0.08을 적용했을 때보다 버 발생시기가 지연되고, 버 발생량이 감소하는 것으로 나타났다.
2. 펀치형상을 변경하여 마찰력을 증가시킨 결과 금형면에 마찰상수를 차등적용 했을 때와 유사하게

버 발생이 억제되고 스플라인 하단부 성형성이 향상되었다.

3. 단조 중 금형 마찰상수는 측정이 불가능하여 실제 금형 마찰상수 변경을 위해 표면 거칠기 조절 방법을 적용하였으나, 해석과 실험결과 비교에서 마찰상수가 소재유동에 큰 영향을 미치는 것이 입증되었다.

## 후 기

본 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] H. Y. Cho, J. U. Cho and G. S. Min, "Study on the forging of splines with hollow and solid billets", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 108-115, 1996.
- [2] C. B. Wang, S. J. Lim and Y. B. Park, "Effect of the design parameter for internal spline forming using the tube", Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 15, No. 7, pp. 512-517, 2006.
- [3] D. H. Jang, S. H. Cho and B. B. Hwang, "Finite element analysis for frictional contact problem of axisymmetric deforming bodies", Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 12, No. 1, pp. 26-33, 2003.
- [4] J. H. Lee, Y. S. Lee and J. J. Park, "Dimensional Accuracies of cold-forged spur gear" Journal of the Korean Society for Technology of Plasticity, Vol. 5, No. 2, pp. 115-121, 1996.
- [5] C. M. Cormack and J. Monaghan, "A



finite element analysis of cold-forging dies using two and three dimensional models”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118, No. 1-3, pp. 286-292, 2001.

- [6] K. W. Kim, Y. T. Kim, W. J. Kim and H. Y. Cho, "Finite element analysis for multi-stage forging process design of bolt with nonaxisymmetric washer cam", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 32, No. 4, pp. 585-595, 2008.



**조해용 (趙海龍)**

1957년생, 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1985년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학석사), 1991년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학박사), 1993~현재 충북대학교 기계공학부 교수, 2007~현재 중전기 미래 기술 개발 연구센터 연구센터장(산업자원부지정)

**저 자 소 개**



**김관우(金寬佑)**

1974년생, 1997년도 충북대학교 공과대학 정밀기계공학과 졸업(공학사), 2001년 충북대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 충북대학교 정밀기계공학과 박사과정



**이석진(李錫珍)**

1975년생, 1998년도 충주대학교 기계설계학과 졸업(학사), 2008년도 충북대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 (주)제주항공 항공기정비본부 재직



**김문기(金文基)**

1980년생, 2007년도 충북대학교 공과대학 기계공학과 졸업(공학사), 2008년 충북대학교 대학원 기계공학과 석사과정



**조성열(趙誠烈)**

1982년생, 2007년도 충북대학교 공과대학 기계공학과 졸업(공학사), 2008년 충북대학교 대학원 기계공학과 석사과정