

## 유동제어 성형기술을 이용한 자동차 허브클러치의 실험적 연구

박종남\*, 계중읍\*, 김병민\*\*

### A Experimental Study of Automobile Hub Clutch used Flow Control Forming Techniques

Jong-Nam Park\*, Joong-Eup Keh\* and Byung-Min Kim\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, the metal forming process is caused of rise of the unit cost of production in increase of the lead-time and cost because of manufacturing final product through a few the number of processes. Flow control complex forming is proposed to put into formulation in order to apply cold forging from conventional approximate similarity theory, and the forming loads of the real material(AISI 1008) can be calculated by put at the new similarity formula the load by plasticine model material experiment through hub clutch. In order to reduce lead-time and cost the technology is used to manufacture with lower die of this product. By the application synthetic resin as the raw material, it is have the merit such short lead-time, low cost, good surface finish etc., as compared with the machine work.

**Key Words** : Flow control forming(유동제어 성형), Hub clutch(허브 클러치), Metal flow(금속 유동), Model material experiment(모델재료 실험)

#### 1. 서론

금속성형 공정은 보통 매우 짧은 시간에 금속의 가소성을 이용하여 스크랩의 발생없이 임의의 형태로 변화시키는 금속가공의 한 분야로서 제품을 생산함에 있어서 소재의 손실과 생산에 소요되는 시간을 최소로 줄이면서 기계적 성질이 우수한 제품을 생산하는 방법이다. 이러한 공정은 다이캐스팅, 기계가공 등에 의한 제작품보다 기계적 성질이 뛰어나며 가공속도가 빠르고 후속공정을 줄일 수 있

기 때문에 널리 이용되어 왔다.

유동제어 성형(FCF: Flow control forming) 기술은 기본적으로 판금성형과 냉간 단조기술을 조합한 복합적인 성형 방법으로서 판재에 의한 단조적인 성형을 포함하는 프레스 가공기술을 이용해 재료에 소성유동을 적극적으로 부여하여 단면형상을 변화시키는 데 있다. 이 공법은 기존의 소결, 다이캐스팅, 인젝션 몰드, 기계가공 등의 제품을 프레스 성형으로 치환이 가능하여 냉간성형에 의한 고정밀도가공, 가공공정수 단축, 재료손실의 최소화, 제품의

접수 2002년 7월 8일

\* 국방품질관리소

\*\* 부산대학교 기계공학부

경량화 등의 고부가가치를 실현할 수 있으며<sup>(1)</sup>, 이를 위해서는 제품 성형이 가능한 복동식 프레스 확보와 이론적인 해석기법 개발이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 자동차 자동변속기에 조립되는 치형이 있는 허브 클러치를 주요 연구 대상으로 선정 후, 복동 성형에 따른 유동제어 성형공법을 개발하여, 그에 따른 제반 성형기술을 확보하고자 한다.

초기 소재로부터 예비 성형공정을 거쳐 이론해석을 통해 예비성형체를 얻고, 이로부터 치형을 갖는 최종 제품을 몇 개의 공정을 조합한 동시 성형으로 최적의 유동조건을 구하고자 한다. 예비성형체는 상·하부 금형의 구동방식에 의한 금형간의 간섭을 방지하고 제품 치형부로의 소재 채움상태가 원활하도록 치형부쪽의 소재 유동량을 확보하기 위한 구조로 설정하였다. 두께가 얇은 치형부의 소재 채움상태 등 정확한 재료 유동양상을 조사하기 위해 3차원 해석을 수행하고, 펀치 상대속도 변화와 금형구조 변경 등에 따라 미치는 영향을 조사하였으며, 최적의 성형조건으로 실험을 수행해 얻은 결과는 해석결과와 비교하였다.

## 2. 유동제어 복합 성형기술

복합 성형기술은 블랭킹, 드로잉, 벤딩, 버링 등의 판금가공에 업세팅, 아이어닝, 압출 등의 냉간단조를 조합하여 동시에 가공하는 개념으로서 유동제어 성형공법이라 부르고 있다. 이 기술은 재료에 소성유동을 부여하여 최종형상대로 제품을 가공함으로써 판재에 의한 단조적인 성형을 포함하는 프레스가공, 파이프상의 소재에 의한 기어성형 등이 가능하다. 그리고 기존의 프레스 가공이 단일적인 소성가공인 반면 고정밀도화나 절삭가공 부품을 프레스 가공화로, 혹은 2~3개 부품의 코킹, 조립부품을 일체로 성형할 수 있다.

유동제어 복합성형에 관한 국내외 연구 내용으로서 Osakada 등<sup>(2)</sup>은 전·후방 압출공정에서 컨테이너 구동을 이용한 유동제어로 소재의 전·후방부 금형내의 동시충만을 통한 압출하중 감소에 대하여 연구하였다. Nakano<sup>(1)</sup>는 소성유동을 제어하는 정형가공의 유용한 방법인 복동성형과 복합단조 기술이 다이캐스팅 등 다른 분야로의 공법전환이 가능케 되어 프레스 가공분야가 확대될 것으로 전망했고, Maeda 등<sup>(3)</sup>은 자동변속기에 조립되는 판금제 치형 부품의 기존 가공 방법과 드로잉 및 단조기술을 조

합한 프레스가공으로의 판금화 기술개발 현황에 대해 소개하고 있다. 또한 Nakano<sup>(1)</sup>는 대상제품의 성형방법에 따라 전용 복동식 프레스에 의한 방법과 금형 등에 의한 구동방법으로 제품성형 가능함을 여러 가지 대표적인 사례를 들어 설명하였다. 국내에서는 Bae 등<sup>(4,5)</sup>이 비축대칭 알루미늄 제품의 평균형 압출에서 플라스틱인 모델재료 실험을 통해 재료의 유동제어에 관한 최적의 베어링 렌드부를 결정할 수 있는 실험식을 유도하였다.

## 3. 허브 클러치의 구조 및 특성

자동차의 변속기는 엔진과 추진축 사이에서 엔진의 동력을 자동차의 주행상태(발진, 등판, 평탄로 주행 등)에 맞도록 기어물림을 변경시켜 그 회전력과 속도를 바꾸어서 구동바퀴로 전달하는 장치로서, 기어 형태의 부품이 많으며, 대부분 강도 및 정밀도 측면에서 높은 등급을 필요로 한다.

이들 부품은 형상이나 크기 및 요구품질, 비용 등에 차이가 있으나 대부분 절삭가공으로 제조한다. 그러나 동력 전달용 구동 부품들은 고강도에 의한 경량화와 가공비 절감이 요구되어 점차 금형을 이용한 프레스 정밀단조 및 복합성형공법 등을 통한 정형가공이 필요하다.

허브 클러치 제품은 기존에 다단 드로잉 공정을 거친 후 프레스 치형가공을 두 공정으로 하여 최종 제품을 생산하므로, 공정수 감소와 제품 강도 향상이 필요하다. 또한 동력 전달시 진동 및 소음 방지를 위한 내·외경의 동심도 및 직각도가 중요하고, 클러치 바닥부의 평탄도와 치형 성형후의 두께가 균일해야 하며, 내경부의 공차를 최소화하여 축의 진동을 방지해야 하는 등의 설계조건을 만족해야 한다. 허브 클러치는 내·외경부에 스플라인식 치형이 있고 내부에는 외벽과 동일한 방향으로 허브가 돌출되어 성형이 까다로운 구조로 되어 있다.

## 4. 허브 클러치의 해석 및 설계

### 4.1 유한요소 해석

허브 클러치의 실제 소재는 AISI 1008로서 플라스틱인 모델재료를 이용해 성형해석과 실험을 수행하였다. 해석은 강소성 유한요소법을 이용하였으며, 성형해석을 위한 플라스틱인 재료의 유동응력식은 압축시험을 통해 아래 식(1)을 얻었다.

$$\bar{\sigma} = 0.224 \bar{\epsilon}^{0.117} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

또한 실제 재료의 유동 응력식은 아래 식(2)와 같다.

$$\bar{\sigma} = 657 \bar{\epsilon}^{0.24} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

소재와 금형의 접촉면은 탈크 파우더로 윤활처리를 하여 링 압축시험 결과인 마찰상수  $m=0.1$ 로 해석을 수행하고, 강소성 유한요소 코드인 DEFORM-2D<sup>6)</sup>를 이용하였다.

#### 4.2 초기소재 및 예비성형체의 설계

형상이 복잡한 단조품의 설계는 최종제품의 형상 및 요구조건에 따라 중간단계의 예비성형체가 필요하며, 기계도면의 치수대로 한번에 성형하는 것은 상당히 어렵다. 따라서 Fig. 1과 같은 초기 소재로부터 예비성형체를 결정 후 성형가능성을 검토하고 최종 형상을 가공한다.

본 논문에서 적용하고자 하는 예비성형체는 프레스 복동방식 및 금형구조에 따라 제품성형이 가능한 구조로 하고, 초기 소재 및 예비성형체의 설계를 DEFORM-2D, 3D로 해석하였다. 초기소재는 후판을 이용한 내경을 갖는 링(ring) 형태로 하여 예비성형체를 해석하였고, 예비성형체로부터 최종 제품 성형시 소재유동을 원활히 하기 위한 형상으로 설계하였다. 초기소재의 체적은 예비성형체 및 최종제품의 체적과 동일하게 하여 해석하였다.

예비성형체는 초기소재로부터 드로잉 공정을 거치지 않고 후방압출 방법을 이용해 컵 높이가 낮은 'ㄱ'자 형상으로 하였다. 중간의 돌출된 허브 부위는 생략하여 컵 형상으로 구성하고 바닥부위의 두께는 치형부로의 소재 유동량이 충분하도록 Fig. 2와 같이 두껍게 하였다. 허브클러치 제품의 치형 가공을 좋게 하기 위해서는 예비성형체 형상이 중요하다.

최종 치형가공시 외곽쪽에 위치한 치형부의 내외측 코너부의 소재 충전 여부는 두 구동부의 압축력에 의한 충분한 양의 소재공급과 원활한 소재유동에 의해 좌우되며, 허브쪽으로는 유동량이 상대적으로 적은 경우는 초기소재 상태에서부터 버림을 고려한 설계가 필요하다.

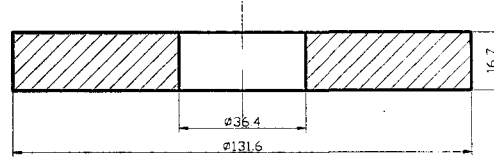


Fig. 1 Dimension of initial billet

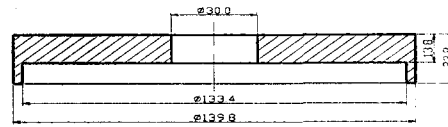


Fig. 2 Shape and dimension of preform

### 5. 유동제어 성형공법에 의한 공정설계

#### 5.1 유동제어에 의한 최적설계

소재유동의 원활한 제어를 위하여 복동식 프레스 성형방식의 금형구조를 상부금형, 하부금형 그리고 펀치로 구성하고, 상부금형과 펀치의 속도를 변화시켜 성형해석을 수행하였다. 예비성형체로부터 최종 제품의 성형성을 평가하고 치형부로의 소재 채움상태 등을 확인하기 위해서 DEFORM-3D를 이용하였다.

상부금형과 펀치의 스트로크 증가에 따라 소재는 이동하고 그 상대속도에 의해 제품의 성형상태가 주로 결정되므로 제품의 허브부위 및 치형부로의 재료유동이 균일하게 분포되기 위한 최적의 속도비는 이등분법(bisection method)을 이용해 구하였으며, 예비성형체의 체적은 최종제품의 체적과 동일하게 하고 상대속도비를 변화시켜 해석하였다. 이 경우에 있어서 결함이 없는 제품을 성형하기 위한 가장 중요한 변수는 상부금형과 펀치의 상대 속도비이다. 유동제어 성형방식을 이용한 허브 클러치의 공정설계 및 모델재료 실험을 위한 흐름도를 Fig. 3에 나타내었다.

유동제어 성형방식을 위해서는 구동하는 상부금형과 펀치에 의한 소재유동의 원활한 제어가 필요하고, 각각의 속도를 변화시켜 성형해석을 수행

하였다. 상부금형과 펀치의 속도는 펀치의 속도  $V_p$ 에 대한 상부금형의 속도  $V_d$ 를 상대속도비로 식 (3)과 같이 정의하고 상대 속도비를 조정하여 해석을 수행하였다.

$$\frac{V_d}{V_p} = RVR \text{ (Relative velocity ratio)} \quad (3)$$

여기서,  $V_d$  : Velocity of upper die  
 $V_p$  : Velocity of punch

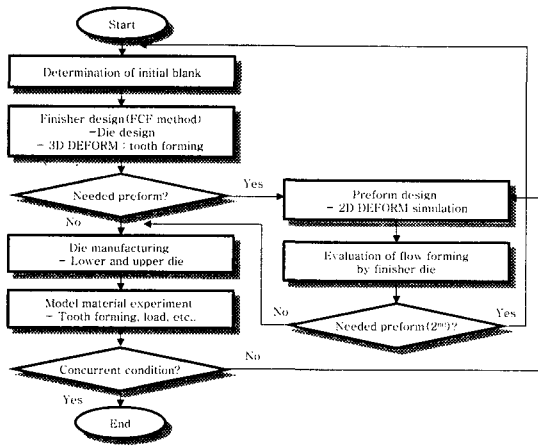


Fig. 3 Flow chart of hub clutch product

### 5.2 상대 속도비에 의한 성형해석

유동제어 성형공정에서 두 구동부의 최적의 상대속도비는 재료유동을 원활하게 하여 양호한 제품 성형이 가능하다.

먼저 상대속도비가 1.5인 경우는 중앙의 펀치속도가 상부금형에 비해 상대적으로 빠르게 하강하므로 펀치에 의한 허브쪽으로의 소재 미 충전 현상이 발생한 반면, 상부금형에 의한 치형길이는 도면 치수인 34.0mm에 비해 약 2.7mm 더 긴 36.7mm로 나타났다. 이는 업세팅에 의해 압축을 받은 소재가 허브쪽으로 충분히 유동하기 전에 펀치가 허브안쪽으로 먼저 유입되어 소재 흐름을 제한하고 계속적으로 압축력을 받은 소재는 치형방향으로 이동되어 치형길이가 길어지고 결국 허브 끝단부의 소재 미

충만 현상이 발생됨을 Fig. 4로부터 알 수 있다. 이때의 최대 성형하중 값은 성형 후반부에서 약 45.5kgf 이다.

상대속도비가 3.5인 조건에서는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 1.5인 조건과 달리 상부금형의 속도가 펀치보다 상대적으로 크기 때문에 상부금형에 의해 압축되는 소재는 펀치선단보다 빠르게 허브쪽으로 유입되어 치형부 길이가 29.0mm로서 도면 치수보다 약 7.0mm 더 짧게 나타났다.

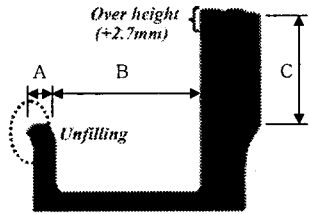
이는 상부금형에 의해 압축되는 소재가 내경방향으로 유동되고 일정량 이상의 유동량이 느리게 하강하는 펀치선단보다 먼저 허브 안쪽방향으로 유입됨에 따라 허브쪽으로의 재료손실 현상과 치형방향의 소재유동량이 부족하여 치형길이가 정상보다 짧아지고 일부 치형부 코너부에 미 충전 현상이 발생하였다. 이때의 최대 성형하중 값은 가공 후반부에서 약 37.5kgf로서 상대속도비 1.5인 조건에 비해 하중값이 적게 나타나, 완전 치형성형을 위해서는 하중이 크게 증가함을 알 수 있다.

상대속도비가 2.5인 조건에서는 상부금형과 펀치의 하강속도가 일정한 비율로서 허브 및 치형방향으로 데드메탈 영역 없이 일정하게 유동되어 재료손실과 미 충전 결함 없이 양호한 형상을 얻을 수 있었으며, 치형 길이는 약 32.0mm로서 도면 치수보다 약 2mm 짧게 나타났으나 대체로 잘 일치하였다.

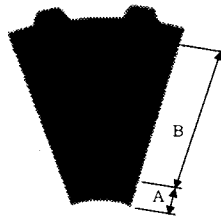
예비성형체의 판재 부위는 상부금형에 의해 업세팅 공정으로 압축력을 받고 일부분 허브방향으로 유동되며, 이와 동시에 하강 펀치에 의해 이동되는 소재는 구속되고 허브부는 펀치에 의해 성형이 이루어진다.

치형부위는 압축되고 아랫방향으로 유동되는 소재는 치형 시작 전에서 하중값이 약 37kgf으로 급격히 증가하여 유동이 일시 정지하는 현상이 나타났으나, 스트로크가 증가하면서 치형부에서는 전방압출과 아이어닝으로 치형쪽으로 유동되는 소재가 압축되어 각 치형 곡률부까지 성형이 이루어진다.

이때의 최대 성형하중 값은 성형 후반부에서 약 41.5kgf이었고, 성형 후반부에 형성되는 치형부쪽에 대체로 높게 나타났으나 전체적으로는 균일한 경향을 Fig. 6에 보였다.

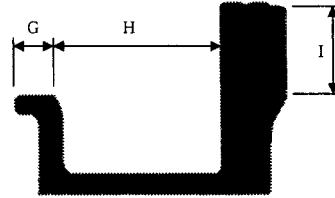


(a) Front view

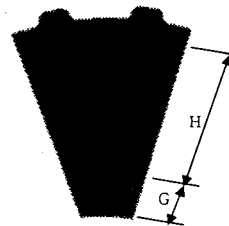


(b) Top view

Fig. 4 Result of DEFORM-3D simulation at RVR 1.5 condition

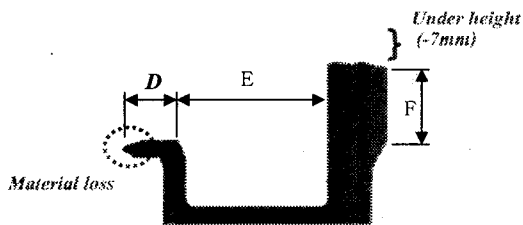


(a) Front view

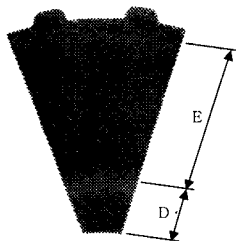


(b) Top view

Fig. 6 Result of DEFORM-3D simulation at RVR 2.5 condition



(a) Front view



(b) Top view

Fig. 5 Result of DEFORM-3D simulation at RVR 3.5 condition

## 6. 모델재료 실험

### 6.1 금형제작 및 실험방법

복동방식을 이용한 허브 클러치 제품의 모델재료 실험은 복동식 프레스 장비를 이용하고, 프레스 장비, 금형 및 실험장치로 구성하여 실험하였다. Fig. 7은 금형구조를 나타내었다.

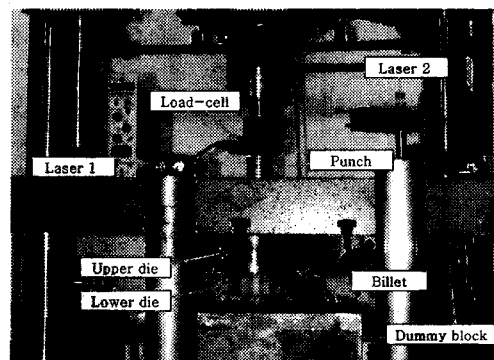


Fig. 7 Set up of press, die sets and measurement equipment

실험에 이용된 예비성형체는 이론해석 결과로부터 구한 치수로 하여 플라스틱을 잘 혼합하여 만들었으며, 균일한 시편을 만들기 위해 별도로 시편 제작용 치구를 제작하여 이용하였다.

상부금형은 일반 강재 AISI S1을 소재 상태로 가공하여 프레스 상부 베드면에 고정할 수 있는 크기로 제작하였다. 내치형 스플라인 치형은 셰이빙 머머신에 의한 피니언 커터를 제작해 치형을 가공하였으며, 펀치는 AISI 1045 재질로 담금질 및 뜨임 처리를 하여 사용하였다.

모델재료 실험은 수지로 제작한 하부금형을 더미블록(dummy block)위에 두고 예비성형체를 올려놓은 후 상부금형과 펀치의 하강 속도를 변화시키면서 수행하였다. 특히 스트로크 증가에 따라 재료 유동의 원활한 흐름을 위해 상부금형과 하부금형부의 치형 중심위치가 정확히 배열되도록 주의하였고, 두 구동부의 하강 속도는 레이저 측정기를, 성형하중 값은 로드셀을 이용해 측정하였다.

## 6.2 실험결과 및 고찰

모델재료 실험에서 상부금형과 펀치가 동시에 성형완료되는 최적의 상대속도비인 2.5인 조건에서 실험을 수행하였다. 실험결과, 전체 형상은 균일하게 나타났으며, 치형부의 전장길이, 코너부 소재 채움상태 모두 양호하게 나타났고, 중앙에 위치한 허브 부위도 버링 공정에 의해 원활하게 유동되었고, 바깥부분의 치형상태도 Fig. 8과 같이 원활하게 형성됨을 볼 수 있다.

최대 성형하중 값은 성형 후기에 약 42.8kgf로서, 본 논문에서 제시한 상사식에 대입하여 구한 결과 약 1,429톤으로 해석치와 잘 일치하였다. 압축력에 의해 유동되는 소재는 치형 성형이 시작되는 이뿌리 선단부에서 일시 정지하여 하중이 증가하였으나 점진적으로 소재 압축에 따른 하중은 증가하였다.

반면 상대속도비가 1.5인 조건에서는 중앙 펀치의 속도가 상대적인 상부금형 속도보다 빠르게 하강되어 상부금형에 의해 압축력을 받은 소재가 허브 안쪽으로 유입되기도 전에 펀치는 허브 안쪽으로 들어와 뒤늦게 유동되는 소재 흐름을 막게 되고, 펀치에 의한 버링 공정은 소재의 유동량이 적어 원활하게 이루어지지 못하게 됨에 따라, Fig. 9와 같이 허브방향에 재료 미충만 현상이 발생됨을 볼 수 있다.

펀치에 의한 허브쪽에서의 유동 방해는 결국 치형이 있는 외경쪽으로 소재 흐름을 유도하게 되어 치형부의 길이가 약 4mm 길게 나타났으며, 이때의 최대 성형하중 값은 성형 후반부에서 발생한 것으로 약 1.12톤으로 나타났다.

반대로 상대속도비가 3.5인 조건에서는 펀치 속도에 비해 상부금형 속도가 빨라 초기에 상부금형에 의해 압축을 받은 소재는 허브 안쪽으로 급속히 유동되나 뒤이어 유입되는 펀치에 의해 유동이 제한된다. 이때 먼저 허브 안쪽으로 유입된 소재는 펀치에 의한 드로잉 성형시 펀치 선단부에서 불필요한 재료 손실이 발생되고 재료가 뭉쳐진 현상이 발생되었다. 이로 인해 치형부 길이방향으로 소재 이동량이 적게 되어 치형길이가 짧게 되고 일부 치형 코너부에 미충만 현상이 나타났는데, 3차원 해석결과와 잘 일치하였다. Fig. 10은 일부 치형 코너부에 소재의 미충만된 상태를 보여주고 있으며, 최대 성형하중 값은 성형 후반부에서 약 40.6kgf이었다. 실제 재료의 성형하중 값은 최적의 속도비인 2.5인 조건에서 모델재료 실험을 실시하여 그 값을 예측하였다. Fig. 11과 같이 모델재료로 예측한 값은 유한요소 해석값 보다 약간 높게 나타났으나 대체로 일치하였다.

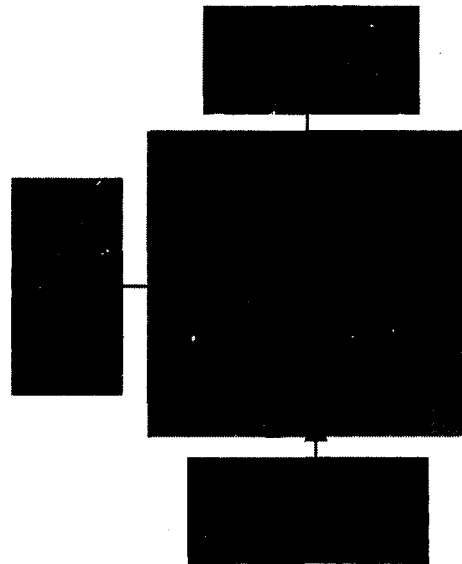


Fig. 8 Sound metal flow at RVR 2.5 condition

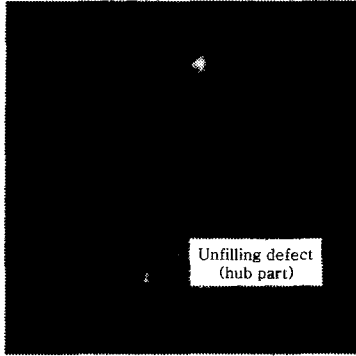


Fig. 9 Unfilling defect on hub part(center) at RVR 2.5 condition

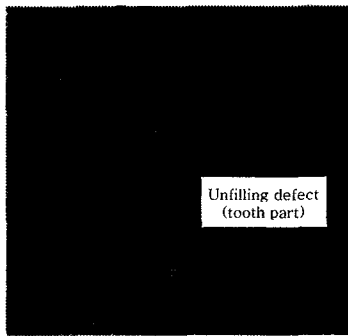


Fig. 10 Unfilling defect on tooth part at RVR 2.5 condition

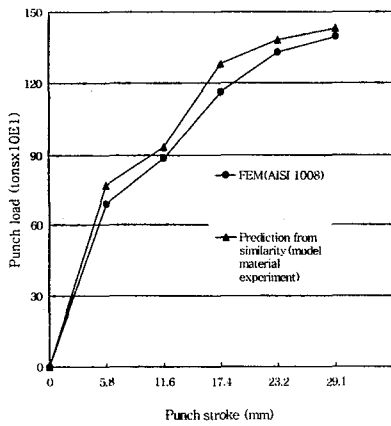


Fig. 11 Prediction of punch load for real material (AISI 1008)

Table 1은 상대속도비 변화에 따른 3차원해석과 모델재료 실험에 의한 제품 치수 및 결함 형태를 정리하여 나타냈다.

Table 1 Comparison of tooth and length, punch load to RVR by 3-D FEM and model material experiment

속도비	길이	치수	치수	치수	치수	치수	결함	참고
36.7	25.6	45.5	38.3	26.0	49.5	Hub unfilling	Fig. 8	
32.0	26.4	41.5	32.5	27.0	42.8	No defect	Fig. 9	
29.0	26.5	37.5	28.2	26.5	40.6	Tooth unfilling	Fig. 10	

따라서 치형이 있는 클러치류 제품을 복동식으로 성형시 제품 성형상태에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 두 구동편치의 상대속도비임을 3차원 유한요소해석과 모델재료 실험을 통해 알 수 있었다.

### 7. 결론

치형이 있는 허브 클러치 제품은 형상이 복잡하고 특히 치형부의 성형이 까다로운 구조로 되어 있어 기존에 8회의 드로잉 공정과 두 번의 치형가공으로 제작하였다. 본 논문에서는 유동제어 성형공법을 적용해 상부금형 및 편치가 구동하는 복동식으로 구성하여 공정수를 줄이고 치형부의 소재 미충만 결함이 발생하지 않는 조건으로 공정설계를 실시하여 모두 두 번의 공정, 즉 치형가공 전 예비성형과 치형성형을 포함한 최종 성형공정으로 제품을 성형하는 방안을 제시하였다. 이를 위해 3차원 유한요소 성형해석과 모델재료 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 제품 공정설계를 실시하고 예비성형을 포함한 두 공정으로 성형가능한 공법을 제시하였다.

(2) 예비성형체로부터 판 두께 제어는 업세팅 공정, 허브부는 드로잉 및 버링 공정, 그리고 치형부는 전방압출과 아이어닝 공정에 의해 한 공정으로 성형 가능함을 3차원으로 해석하고, 이를 모델 재료 실험을 통해 검증하였다.

(3) 상부금형과 펀치의 상대속도비가 2.5인 조건에서 양호한 제품을 얻을 수 있었다.

(4) 또한 이 조건에서 최대 성형하중 값은 본문에서 제시한 상사이론식을 통해 구한 결과 약 1,430톤 정도로서 이는 유한요소 해석과 대체로 잘 일치하였다.

(5) 기존에 10공정 제조방법을 2공정으로 대폭 줄일 수 있었다.

(6) 치형이 있는 복잡한 제품도 유동제어 성형 공법을 잘 활용하면 최소의 공정수로 결합없는 제품 성형이 가능할 것이다.

### 참고문헌

1. T. Nakano, "Modern Applications of Complex Forming and Multi-action Forming in Cold Forging," J. of Materials Processing Technology, No. 46, pp. 201-226, 1994.
2. K. Osakada, X. Wang and S. Hanami, "Forward-backward Extrusion with Axially Driven Container," Journal of the JSTP, Vol. 37, No. 430, pp. 1154-1179, 1996.
3. A. Maeda, K. Araki, "Forming Technique of Tooth Parts Using Sheet Material," Journal of the JSTP, Vol. 39, No. 445, pp. 106-110, 1998.
4. 이종현, 김영호, 배원병, 이원희, "고온 연강 유동 특성을 연구하는 모델재료 개발에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제17권, 제5호, pp. 1161-1171, 1993.
5. 이희인, 배원병, "스파이더의 측방 압출 공정에 대한 UBET 해석," 한국정밀공학회지, 제18권, 제6호, pp. 174-181, 2001.
6. SFTC, DEFORM 2D user's manual.