

자동차용 시동 모터 정류자의 단조공정 개발에 관한 연구

서명규, 배원병*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 정호승, 조종래(한국해양대 기계공학과)

A Study on the Forging Process Development of the Commutator of an Automotive Starting Motor

M. K. Seo, W. B. Bae* (Mecha. & Prec. Eng. Dept, PNU), H. S. Jeong, J. R. Cho(Mecha. Eng. Dept., KMU)

Abstract

Commutators of a starting motor for automobiles has been produced through various processes such as forging, segmenting, and assembling. And the conventional method producing an automotive motor commutator is not appropriate for saving material and cost, because it makes each segment separated one by one. Therefore a new process design is required in order to avoid the assembling process.

In this study, a new process design of the commutator of an automotive starting motor has been carried out to save material and manufacturing time by FE analysis. In the FE analysis, three forging processes are proposed for producing the copper(ASTM C11000) commutators of a starting motor.

And forging experiments are performed to make an unsegmented commutator in order to verify the theoretically proposed process. And then, in order to get the final product, the forged commutator is passed through various postprocessing such as resin forming, and machining.

From the experimental result, the forging process proposed from the FE analysis is verified to be an economical method for producing the commutator of an automotive starting motor.

Key Words : Commutator(정류자), Starting motor(시동모터), Copper(ASTM C11000), FE analysis(유한요소해석), Forging process(단조공정)

1. 서론

전동기의 구성부품은 회전부분인 전기자와 정류자, 계자를 형성하는 계자철심과 계자권선, 전기자 코일에 전류를 공급하는 브러시와 브러시 홀더 등으로 구성된다. 정류자는 전기자 권선과 연결된 정류자편(commutator segment)의 사이마다 절연체를 넣고, 환봉형으로 가공된다. 정류자에는 브러시가 접촉되어 전기자 권선에 전류를 공급한다. 정류자와 브러시는 권선에 흐르는 전류의 방향을 교대로 그리고 연속적으로 변환시켜, 전기자가 항상 똑같은 방향으로 회전하도록 하는 기능을 한다. 정류자편의 재질로는 대부분 경동이 사용된다. 그리고, 운모나 합성수지를 사용하여 정류자편 사이를 절연한다.^(1,2)

전동기의 주요부품인 정류자는 그 용도에 따라 형상, 크기 및 전기적 성능이 다양하고 수요가 많은

부품이다.

특히 자동차의 시동장치의 주요부품인 시동모터는 큰 전류와 전기자의 회전으로 일시적으로 큰 부하가 걸리기 때문에 부품이 크며, 강도가 요구되며, 높은 회전속도와 고전류에서 작동해야 하는 내구성이 필수적이다. 시동모터용 정류자는 일부 국내에서 생산되고 있지만, 많은 공정과 소재낭비 등의 문제점이 남아 있다. 위의 정류자는 제조공정의 난이성과 고성능의 제품 특성을 만족시키기 위해 각 공정의 금형설계와 공정설계, 제품성능시험 등 체계적인 연구개발이 필요하다.

본 연구의 목적은 하나 하나의 정류자편을 따로 성형하여 조립하는 세그먼트 법과 틀링법에 비교하여 냉간 단조에 의해 정류자의 반제품이 성형되고 이후 수지 결함을 통한 정류자 완제품이 제조되는 정류자의 개발을 위해서 냉간 단조공정에서 수치해

석 방법인 FEM을 이용하여 최적의 공정을 설계하는데 있다.

2. 단조공정설계

2.1 강소성유한요소법

유한요소 해석을 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다.⁽³⁻⁵⁾

- 1) 금형은 강체로 생각한다.
- 2) 재료는 등방성이고 강소성체이다.
- 3) 바우싱거효과(Bauschinger effect)는 무시한다.
- 4) 재료가 변형하는 동안 체적변화가 없다.
- 5) 재료는 Von Mises 항복조건을 따른다.
- 6) 온도의 변화는 무시한다.

2.2 시동모터정류자

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 29개의 정류자편으로 이루어진 전체 정류자중에서 하나의 정류자편 형상을 해석모델로 결정하였다. 시동모터 정류자의 단조공정의 설계를 위해서 유한요소해석을 통해 공정모델을 제시하고 초기 소재의 크기(내경, 외경, 높이)를 달리하여 시뮬레이션을 수행하였다. 유한요소해석은 상용 프로그램인 DEFORM 3D를 사용하였다. Table 1에 제시된 조건과 같다.

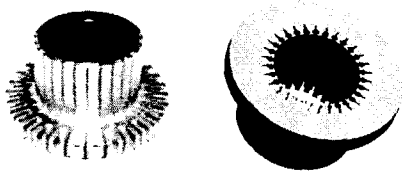


Fig. 1 A commutator for a starting motor

Table 1 Input data for the forging simulation

| | |
|-------------------------|--|
| Material | Tough pitch copper(ASTM C11000) |
| Stress-Strain relation | $\bar{\sigma} = K(\bar{\epsilon})^n$ $K = 451.95(MPa), n = 0.328$ |
| Punch velocity (mm/sec) | 5, 10 |
| Simulation mode | Isothermal |
| Friction factor(m) | 0.1 |

1) 공정모델 I

Fig. 2와 같은 후방 압출형태의 단조공정을 제안하여 유한 요소해석을 하였다. 소재의 외경 부분을 구속 해주어 펀치가 하강함에 따라 소재의 내경부가 하부 금형의 안쪽으로 흘러서 정류자편의 반경방향 형상을 성형하고 펀치의 내경부와 하부금형을 따라 후방 압출되어 정류자편의 길이방향의 형상을 성형한다.

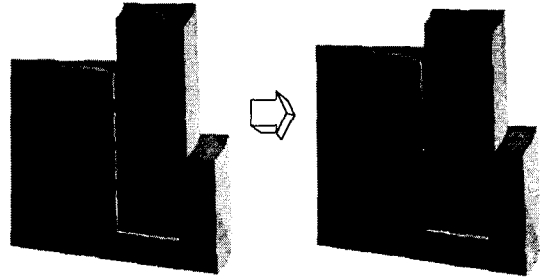


Fig. 2 Forging Model I of a commutator for a starting motor

2) 공정모델 II

Fig. 3과 같이 전방 압출형태의 단조공정을 제안하여 유한 요소해석을 하였다. 소재의 내경, 외경부분이 하부금형에 의해 구속되고 펀치가 하강하면서 소재가 하부 금형의 랜드부를 완전히 통과하여 전방 압출되면서 정류자편의 반경방향 형상과 길이 성형이 완성된다.

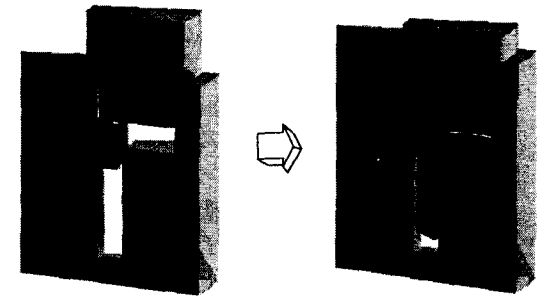


Fig. 3 Forging Model II of a commutator for a starting motor

3) 공정모델 III

Fig. 4와 같이 전방 압출 형태의 단조공정을 제안하여 유한 요소해석을 하였다. 소재의 외경부분이 하부 금형에 의해 구속되어 지고 모델 I, II에서 하부금형에 의해 성형된 정류자편의 반경방향의 형상이 펀치에 의해 성형된다. 소재가 펀치의 형상과 하부 금형의 랜드부를 따라 압출되면서 정류자편의 길이 방향성형이 완성된다.

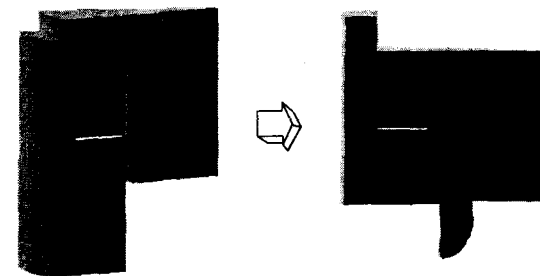


Fig. 4 Forging Model III of a commutator for a starting motor

3. 실험 및 실제품 제조

3.1 압축실험

실험에 사용된 동 소재는 ASTM C11000의 소재로 99.95Cu-0.040의 화학성분을 가지며, 일반적으로 터프 피치동이라 불리는 것으로 정류자와 같은 전기 재료에 널리 사용되는 소재이다. 상업용 터프 피치동에는 미량의 은이 포함되는데 기계적 성질이나 전기적 성질에 대한 영향은 적지만, 재결정온도를 높이고 미세한 입계의 구리를 구성하도록 하는 경향을 가진다.⁽⁶⁾

Fig. 5(a)와 같은 지름 18mm, 높이 18mm의 원주형태의 동 소재를 어닐링 처리(520℃로 가열 후, 30분동안 유지하고 노냉)를 한 상태와 어닐링 처리를 하지 않은 상태로 각각 냉간 압축실험을 하였다. 마찰효과를 줄이기 위해서 윤활유와 그리스를 사용하였다.

이 실험은 유한요소해석에 필요한 동 소재의 유동 곡선을 구하기 위함이며, 일반적으로 봉재는 압출에 의해 만들어졌기 때문에 어닐링 열처리를 함으로써 유동양상이 달라진다.⁽⁷⁾ 초기 응력을 보면 어닐링 처리를 하지 않은 소재의 유동곡선보다 어닐링 처리된 소재의 응력이 많이 낮음을 알 수 있다. 그러나 변형률이 0.5 이상이 되면 어닐링되지 않은 소재와 같아짐을 알 수 있었다.

Fig. 5는 실험 전후의 시편의 형태이며, Fig. 6은 실험을 통해서 얻어진 유동곡선을 나타낸다.



a) Specimen b) Non-annealed c) Annealed (520℃, holding time 30min, cooling in furnace)

Fig. 5 Initial billet and compressed billets of copper (ASTM C11000)

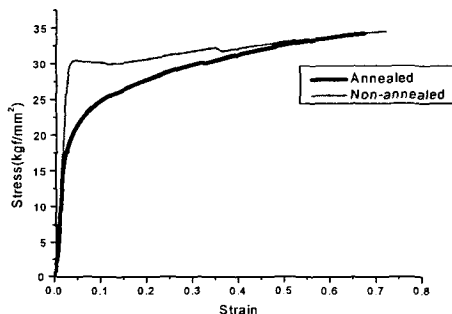


Fig. 6 Stress-strain curve for copper (ASTM C11000)

3.2 납실험

Fig. 7과 같은 납 시편과 실험장치를 이용하여 단조공정에서의 소재의 유동과 해석상의 문제들을 검토하여 보았다. 실험은 200ton 유압프레스를 이용하여 수행하였다. 해석상에서의 공정모델 I은 제외하고 공정모델 II와 공정모델 III에 대해서 납시편의 내경과 높이를 달리하며 실험하였다. 이때, Fig. 8은 공정모델 II의 납 실험용 금형이고, Fig. 9는 공정모델 III의 납 실험용 금형이다.

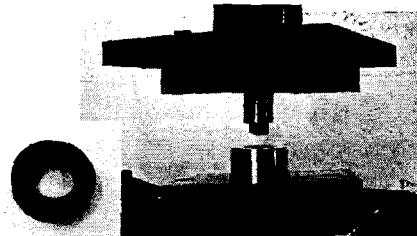
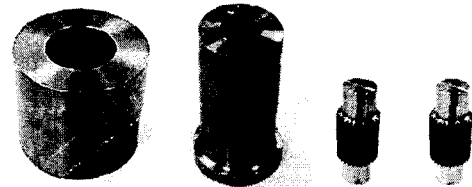


Fig. 7 A lead specimen and the die-set for lead test



a) Die b) Punch c) Die sockets

Fig. 8 Die-set of Model II for the test of the lead specimen



a) Die b) Punch c) Punch sockets

Fig. 9 Die-set of Model III for the test of the lead specimen

3.3 동소재 실험

납 소재의 실험을 통해 검증된 공정모델 III의 방식을 가지고 시동모터 정류자의 단조품을 제작하였다. 유한요소해석의 결과에서의 공정모델 III의 성형 하중은 180ton이하였고, 본 실험은 250ton의 유압 프레스에 의해 성형되었다. Fig. 10은 실험에 사용된 동 시편이다. 유한요소해석과 납 실험을 통해 수정되어진 금형의 형상대로 금형을 제작하여 시동모터 정류자의 단조품을 제작하였다. Fig. 11은 실험을 위

해 제작된 단조 금형이다. 단조공정에 의해 성형된 시동모터정류자의 반제품은 절연수지성형과 내외부 가공에 의해 시동모터 정류자로 완성된다.

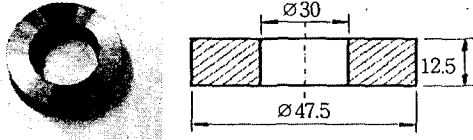


Fig. 10 Copper specimen for manufacturing test

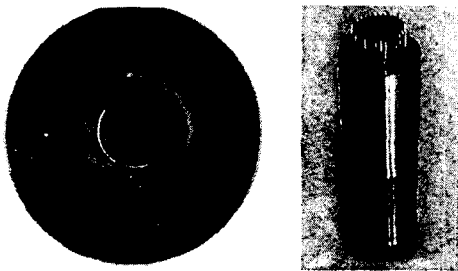


Fig. 11 Die and punch for manufacturing test

4. 결과 및 고찰

4.1 FEM 해석

Fig. 2와 같은 후방 압출형태의 단조공정 공정모델 I 은 성형상의 문제는 적으나 생산과정에서의 취출이 다소 어려운 것으로 보인다.

Fig. 3과 같이 전방 압출형태의 단조공정 공정모델 II 는 양호한 성형 형태를 얻을 수 있었으나, 랜드부의 길이에 따른 마찰로 인해 성형하중이 높게 나타난다. 이때 랜드부 길이를 그림과 같이 짧게 해준 경우 마찰은 줄일 수 있으나 금형의 안정성과 수명에 문제가 있을 것으로 판단하였다.

Fig. 4와 같이 전방 압출형태의 단조공정 공정모델 III 은 소재가 펀치의 형상을 따라 정류자편 단면의 모양이 성형되며 하부 금형의 랜드부를 따라 압출되는 방식의 성형이다. 다소 작은 하중에 의해 성형이 완성되며 취출이 용이하다.

성형하중은 공정모델 I 이 190ton, 공정모델 II 가 200ton, 공정모델 III 이 180ton 정도로 예상되었다. 세 가지 공정 모두 성형이 시작되는 부위 즉, 처음으로 압출되는 부위의 미성형이 다소 발견되었다. 이것은 정류자편의 반경방향 형상을 성형하는 금형부가 길이방향 성형부의 틈보다 좁아서 소재의 흐름이 쉽지 않은 이유인 것으로 보인다. 그러나 이 부분은 선반가공 등에 의해 제거되어 질 부분이다. 앞에서 제안한 3가지 성형방안에서 작은 하중과 취출이 용이한 공정모델 III 의 성형법을 채택하였다.

금형과 소재의 형상을 약간씩 수정하여 해석을 수행해 Fig. 12와 같이 소재 도입부에 각을 주고, 랜드부의 접촉을 짧게 하부 금형의 형상을 수정하였다. 보다 양호한 정류자편 형상을 얻을 수 있었고, 성형시의 예상하중도 $6 \times 29 = 174(\text{ton})$ 로 180ton 이하로 줄일 수 있었다. 이때의 도입각은 10° , 랜드부 길이 $l = 3\text{mm}$ 로 결정하였다.

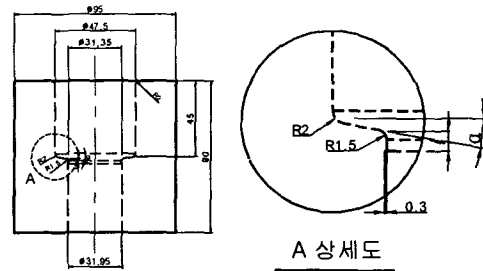


Fig. 12 Adjustment of low die shape for starting motor commutator's experiments

Fig. 13은 결정된 조건으로 수행된 해석의 결과이다. 정류자편의 길이, 내경 부위의 성형이 잘되었고 초기 압출된 미성형 부위와 도입각에 의한 형상은 선반가공에 의해 제거되어진다.

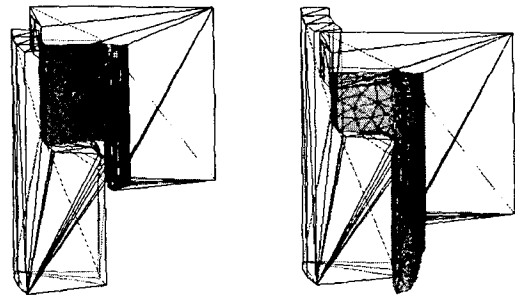


Fig. 13 The final result of FEM simulation

4.2 납 실험

Fig. 14는 각각 공정모델 II 와 공정모델 III 의 실험결과들을 보여준다. a)는 공정모델 II 에 의해 성형된 것인데, 내경부의 정류자편의 성형이 양호하나 전체 길이가 다소 짧고 하중의 증가가 뚜렷하다. b)는 공정모델 III 에서 도입각 $\alpha = 0^\circ$ 일 때로 전체의 길이가 다소 짧다. c)는 공정모델 III 에서 도입각 $\alpha = 10^\circ$ 일 때의 성형이다. 충분한 길이방향 성형으로 끝단부의 기계가공여유가 제공되며 도입각의 영향으로 하중 감소 효과를 볼 수 있었다. d)는 공정모델 III 에서 도입각 $\alpha = 25^\circ$ 일 때의 성형모습이다. c)의 $\alpha = 10^\circ$ 일 때와 거의 차이가 없으나 같은 소재로 가

공시 도입각에 의한 가공부위의 증가가 크다. 이러한 결과를 토대로 공정모델 III의 도입각 $\alpha = 10^\circ$ 의 형상을 최종 단조성형공정으로 결정하였다.

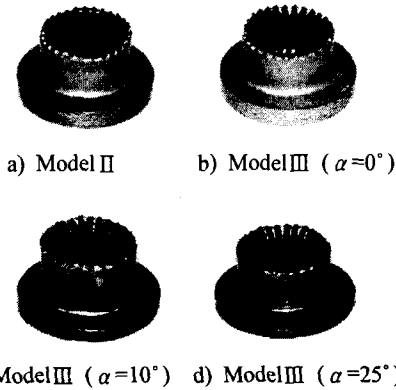


Fig. 14 The result of forging tests with lead specimens

4.3 동소재 실험

해석결과와 납실험을 토대로 Fig. 10의 동 소재를 이용하여 실제품을 제조하였다. Fig. 15는 단일 단조공정에 의해 완성된 시동모터 정류자의 단조품이다. 정류자편의 형상이 매끈하게 성형되었으며 정류자편의 끝부분의 미성형 부위는 시뮬레이션이나 납 실험보다 다소 작았다. 이때 가공하중은 185ton으로 예상하중보다 다소 높게 나타났는데, 이것은 가공중의 윤활 효과가 줄어든 결과인 것으로 판단하였다. 이후 기계가공과 절연수지의 결합을 통해 시동모터 정류자를 완성한다.

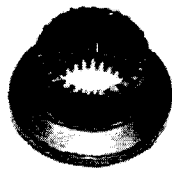


Fig. 15 The completed starting motor commutator through the forging process

시동모터 정류자의 최종 제품에 대한 공정순서를 다음과 같이 단조공정을 중심으로 제안, 설계하였다.

- 1) 시편가공 - 관 절단, 내경 가공
- 2) 냉간단조
- 3) 단면 절삭 및 Bur 제거
- 4) 도브테일(Dovetail)가공
- 5) 라이저(Fiser) 구 절삭
- 6) 절연수지결합 성형
- 7) 내, 외경 절삭
- 8) 라이저(Riser) 구 가공

5. 결론

본 연구에서 3차원 유한요소해석을 통해서 자동차 차용 시동모터 정류자의 단조공정을 제안하였다.

해석과 실험을 위해서 ASTM C11000 소재의 압축실험을 통해 유동곡선을 얻었다. 상용 유한요소프로그램인 DEFORM 3D를 이용하여 단조공정을 설계하였으며, 이때 정류자의 성형형태, 성형하중 그리고 대량생산을 위한 생산성을 고려한 적절한 공정과 금형 형상을 제안하였다. 제안된 단조공정으로 납과 동 소재를 이용한 실험을 통해 정류자를 제작하였다.

(1) 3차원 유한요소해석을 이용해서 자동차의 시동모터 정류자의 성형성과 생산성을 고려한 단일 단조공정을 제안할 수 있었다.

(2) 제안된 단조공정의 타당성을 납 실험과 실제품 제조를 통해 검증하였다. 해석과 실험을 통해서 얻어진 성형하중과 유동양상이 잘 일치함을 알 수 있었다.

(3) 단조공정을 이용해 자동차의 시동모터의 정류자를 제조함으로써 생산공정을 줄이고, 새로운 공정개발을 통해 생산원가절감 및 생산성을 향상시킬 수 있었다.

참고문헌

1. William, H. C., Donald, L. A., "Automotive Mechanics", McGraw-Hill, 1993.
2. 電氣學會 情密小型電動機檢査專門委員會, "소형모터", 普文堂, 1997.
3. Volker Szentmihali, Kurt Lange, Yves Tronel, Jean-Loup Chenot, Richard Ducloux, "3D finite-element simulation of the cold forging of helical gears", Journal of Materials Processing Technology. 43, pp. 279-291, 1994.
4. Kurt Lange, "Handbook of metal forming", McGraw-Hill, 1985.
5. Taylan Altan, Soo-Ik Oh, Harold L. Gegel, 1983, "Metal Forming fundamentals and applications", American Society For Metals.
6. The ASM Committee on Heat Treatment of Copper Alloys, Metal Handbook 2, 1964.
7. Acho, W. A., Lawal, G. I., "On a physico-metallurgically justified inter-annealing schedule for copper", Journal of Materials Processing Technology 72, pp. 308-313, 1997.