

순차이송 금형을 사용한 모터코어 적층과정의 유한요소해석

박 근*, 이인식, 장기정, 최상련 (삼성전기(주) 금형개발실)

Finite Element Analysis for the Lamination Process of a Motor Core using Progressive Dies

K. Park*, I. S. Lee, K. J. Jang, and S. R. Choi

Abstract

In order to increase the productivity of electrical parts, manufacturing processes using progressive dies have been widely used in the industry. Motor cores have been fabricated using progressive stacking die with the lamination procedure for better electro-magnetic property. For the proper design of a process, a prediction of the process is required to obtain many design parameters. In this work, rigid-plastic finite element analysis is carried out in order to simulate the lamination process of the motor core. The effects of the embossing depth and the amount of deviation are investigated and compared with experiments. The forming process can then be predicted successfully from the results of analyses, which enables to design appropriately the die and the process.

KeyWords : Finite Element Method(유한요소법), Progressive Die(순차이송 금형), Stacking Die(적층 금형), Motor Core(모터 코어), Embossing Process(엠보싱 공정)

1. 서 론

최근들어 각종 전자부품에 요구되는 가장 큰 특징으로 부품의 경량화 및 고정밀화, 고성능화, 부품수의 감소화 등을 들 수 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위하여 소성가공, 즉 프레스 작업에 의한 부품 생산이 늘어나고 있는데, 특히 정밀한 소형 부품의 양산화를 위해 프레스가공의 고속자동화 작업의 설비나 기법이 도입되고 있다. 이러한 정밀 부품의 대량 생산에 가장 적합한 생산수단으로는 자동화가 용이하고 정밀도가 높은 순차이송(progressive) 금형을 들 수 있다.

순차이송 금형은 높은 작업능률 및 경제성을 보장할 수 있는 연속 생산용 프레스 금형이다. 순차이송 금형의 대상부품은 형상이 단순한 부품은 물론 대단히 복잡한 부품이라도 재료가 금형속으로 송입되어 통과하는 동안에 원하는 제품

형상으로 신속하게 완성되게 된다⁽¹⁾. 따라서 순차이송 금형은 다른 종류의 금형과는 달리 여러 형태의 작업 공정이 관련을 가지고 조합되어 있으므로 금형의 가격이 매우 높게 차지하는 것이 보통이지만, 대량 연속 생산 또는 지속적 양산 제품에 적용하면 생산성이 훨씬 향상되게 된다.

본 연구에서는 전자부품용 정밀 모터의 코어 부분의 제작을 위한 성형기술을 개발하고자 한다. 모터 코어는 돌기부에 코일이 감겨 전류가 흐르면 자기장을 발생시키는 역할을 한다. 모터의 작동 효율을 높이기 위해서는 코어상에 자기력이 잘 통과해야 하며, 이러한 이유로 모터 코어는 얇은 금속재료를 성형하고, 성형된 소재를 원하는 매수만큼 순차적으로 적층하여 제작되고 있다. 여기서 적층된 소재간의 결합력은 모터의 성능과 수명에 중요한 영향을 미치므로 결합력을 향상시킬 수 있는 금형의 설계변수를 설정해주어

야 한다. 이러한 관점에서 금속의 성형공정을 해석할 수 있는 유한요소해석 시스템을 사용하여 설계된 금형에 따른 코어의 적층공정을 해석하여 공정중 중요한 인자를 추출하고, 각 인자간의 상호 영향 및 공정에 미치는 영향 등을 파악하며 이를 이용하여 시행착오에 따른 경제적, 시간적 손실을 줄이면서 성공적인 공정을 설계하고자 한다. 이를 위해 유한요소해석 프로그램을 사용하여 성형해석을 수행하고, 설계 사양에 따른 해석 결과를 비교함으로써 공정의 특성 및 이에 따른 설계변수들을 추출하여 금형의 설계에 반영하고자 한다.

2. 순차이송 금형을 사용한 모터코어 제조공정

2.1 순차이송 금형의 설계

순차이송 금형을 설계하기 위해서는 여러 가지 사항에 대해 검토해보아야 한다. 우선 제품 치수의 정밀도 및 공차, 그리고 이에 따른 가공성 여부를 고려해야 한다. 또한 가공 소재의 특성, 버어(burr)의 방향성을 고려해야 하며, 제품의 생산 수량과 이에 따른 경제성 여부를 평가해야 한다. 사용 프레스에 있어서도 프레스의 구동 형식, 최대 성형 하중, 장착 가능한 금형셋트의 크기 등을 검토하여 선정해야 한다. 한편 가공 조건에 있어서 이송 방식, 이송 방향, 이송 피치 등을 결정해야 하며, 이송에 문제가 생겼을 경우의 처리방법에 대해서도 예비책을 세워놓아야 한다. 또한 금형 제작과 관련하여 금형의 설치 방법, 가이드 포스트 및 가이드 부시의 형식, 금형 재료의 특성 등 여러 가지 요인을 고려하여 설계하여야 한다.

위와 같은 사항에 대한 종합적인 검토는 스트립 레이아웃(strip layout) 작성 과정과 직접적으로 연계된다. 올바른 스트립 레이아웃 작성을 위해서는 이밖에도 여러 가지 사항을 결정해야 한다. 우선 이송 위치의 결정 방법을 선택해야 한다. 여기서 재료의 이송은 로롤러(roller), 그립(grip)등의 기계적 방법이나 혹은 공기압을 사용하게 되는데, 가공 단계의 수가 많은 경우 이송 피치의 누적오차 때문에 상대적 위치의 정밀도가 저하되게 된다. 이러한 위치정밀도를 보정하는

수단으로서 파일럿 핀(pilot pin)이 사용된다. 또한 재료의 이송 관점에서 밀어서 이송시킬지 당겨서 이송시킬지를 결정해야 한다. 일반적으로 얇은 판의 경우에는 약간의 저항이 있어도 변형되기가 쉬우므로 당김 이송 방식이 바람직하고, 두꺼운 판의 경우에 강성이 있어 변형이 쉽게 되지 않으므로 밀어서 이송하여도 무방하다.

한편 최종 가공 단계에서 가공이 완료된 제품을 금형 밖으로 제거하는 방법에 대해 고려해야 한다. 보통 완성된 제품을 트리밍(trimming)하여 스트립에서 분리하는 방법인데, 이를 고려하여 보통 2-3mm 정도의 가공여유를 준 상태에서 블랭크를 설계해야 한다. 또한 재료의 이용률을 향상시킬 수 있도록 경제적으로 스트립 레이아웃을 설계해야 하는데, 순차이송 금형에 의해 생산되는 제품이 대부분 양산되는 제품인 점을 고려할 때 약간의 재료 절감이라도 전체적으로는 상당한 비용의 절감이 될 수 있다. 예를 들어 블랭크의 폭 및 두께를 가능한 범위 내에서 줄이거나 파일럿용 구멍은 재료의 폭을 넓히지 않는 범위 내에서 제작할 수 있도록 설계해야 한다.⁽²⁾

2.2 모터코어의 제조공정

Fig. 1에 모터코어의 단면형상을 도시하였다. 소재의 두께는 0.2mm이며, 총 22매의 소재를 적층한다. 내부의 슬리브 부분에 6개의 엠보싱 성형(직경 1.0mm)을 수행하여 생성된 요철부를 사용하여 순차적으로 적층공정이 진행되며, 최종 제품에 에폭시 피막처리를 하여 원주방향으로 배열되어 있는 9개의 돌기부에 코일이 권선된다. Fig. 2에 순차이송 금형을 사용한 제조과정을 도시하였다. 단계적으로 살펴보면 중앙부의 구멍에 대한 피어싱 공정, 바깥쪽 9개의 구멍에 대한 피어싱 공정, 슬리브 부분의 피어싱/엠보싱 공정, 외곽의 블랭킹 및 적층공정의 순서로 진행된다.

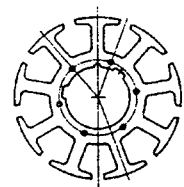


Fig. 1 Schematic view of motor core

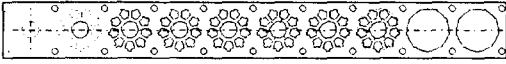


Fig. 2 Strip layout for the progressive die

3. 모터코어 적층과정의 유한요소 해석

3.1 강소성 유한요소법의 수식화

본 연구에서는 금속의 성형공정을 해석하기 위해 소성가공 해석전문 소프트웨어인 DEFORMTM을 사용하였다. DEFORMTM은 강소성 유한요소법⁽³⁾을 사용하고 있으며, 이때 변분방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta v_i dS = 0 \quad (1)$$

식 (1)에서 K 는 비압축성 조건을 부과하기 위한 벌칙상수(Penalty Constant)이며 f_i 는 외력을 의미한다. 금속성형공정에서 외력의 대표적인 예로 금형과 재료간의 마찰력을 들 수 있는데, 다음과 같은 식을 사용하였다.⁽⁴⁾

$$f = -\frac{2}{\pi} mk \tan\left(\frac{|V_s|}{u_0}\right) t \quad (2)$$

여기서 m 은 마찰계수, k 는 해당 접촉점에 있는 재료의 극부적 전단항복응력, u_0 는 V_s 에 비해서 매우 작은 양의 상수값이며, V_s 는 재료와 금형간의 상대속도의 벡터이고, t 는 V_s 방향의 단위벡터이다.

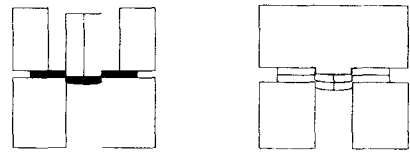
본 연구에서 해석하고자 하는 모터코어의 적층공정에서는 소재와 금형과의 접촉뿐만 아니라 소재와 소재간의 접촉이 발생하는데, 이를 위해 DEFORMTM에서 제공하는 주종관계(master/slave relation)에 의한 접촉처리 기법⁽⁵⁾을 사용하였다.

3.2 적층과정의 해석모델

모터코어의 적층과정을 살펴보면 원주방향으로 60도 간격으로 6개 부분에 엠보싱 공정으로 요철부를 형성하고, 이 요철부분을 접합시킴으로

써 다수의 박판간의 적층 공정이 이루어진다. 실제 소재는 두께 0.2mm의 얇은 박판이지만 엠보싱 성형부에만 국부적인 두께 변형이 발생되므로 셸(shell) 요소를 사용한 박판성형 해석보다는 연속체 요소를 사용한 체적성형(bulk forming) 관점에서의 접근이 타당하다. 또한 엠보싱 공정과 적층 공정 모두 요철부에서만 변형이 집중되게 된다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 요철부에 대해서만 축대칭 유한요소 모델을 적용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 3에 유한요소 해석을 위한 적층과정의 단순화된 모델을 도시하였다. 우선 요철부의 엠보싱 공정을 해석하여 1장의 소재의 변형형상과 내부 응력조건을 계산한 후, 이를 사용하여 높이에 따른 2장의 소재형상을 추출한다. 추출된 2장의 소재간의 상호 간섭을 점검하여 적층을 위한 초기 접촉상태의 위치정보를 계산하여 원하는 압하량만큼 적층과정의 해석을 진행한다. 이러한 과정을 거쳐 원하는 대수만큼의 적층공정의 해석을 진행할 수 있다.



(a) embossing

(b) stacking

Fig. 3 Analysis model for the stacking process

본 연구에서 적층과정의 해석을 통해 적층된 소재간의 결합력을 고찰하고자 한다. 소재간 결합력의 예측은 요철부 접촉영역의 마찰력을 계산하여 유추할 수 있으며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$F_{fric} = 2\pi \int_{z_1}^{z_2} m \tau_{rz} r dz \quad (3)$$

$$\cong 2\pi m \sum_{i=1}^n \tau_{rz}^i r^i (z_2^i - z_1^i)$$

여기서 m 은 마찰계수, τ_{rz} 는 전단응력, r 은 접촉부위의 반경, z_1 과 z_2 는 각각 접촉영역의 z 좌표, n 은 접촉 영역 내의 요소 개수를 의미하며,

적층되는 2개의 소재중에 상단의 소재, 즉 적층되는 소재를 기준으로 정의된다. Fig. 4에 적층부위의 격자구성 형상을 확대하여 도시하였다.

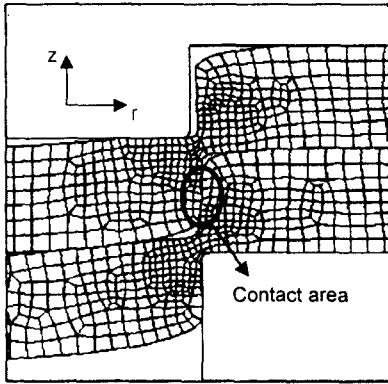


Fig. 4 Mesh structure for contact area

4. 성형조건에 따른 모터코어의 결합력 예측

4.1 압입량에 따른 결합력 예측

식 (3)에서 유추할 수 있듯이 접촉부위의 면적이 늘어날수록 마찰력이 증가한다. 엠보싱 공정 측면에서 보면 요철부 압입량이 증가할수록 접촉부위 면적이 증가하여 마찰력은 증가하는 반면, 요철부 모서리의 두께가 얇아져 제품의 파단 가능성이 존재한다. 이러한 국부적인 파단은 결과적으로 제품의 결합력에 악영향을 미치게 된다. 따라서 마찰력 향상을 위한 접촉영역의 증가와 파단 방지를 위한 최소두께 유지를 위해 적절한 압입량을 설정해주어야 한다. 이를 위해 엠보싱 압입량을 0.12mm부터 0.18mm까지 0.01mm 단위로 증가시켜가며 엠보싱 공정 및 적층과정의 해석을 수행하였다. Table 1에 압입량의 변화에 따른 마찰력의 변화를 정리하였다.

압입량(mm)	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18
압입율(%)	60	65	70	75	80	85	90
마찰력(kgf)	0.997	1.603	1.174	1.226	1.417	1.421	1.469

Table 1. Friction force wrt. stroke

여기서 압입률은 소재의 두께(0.2mm)에 대한 압입량의 비율로 정의하였다. Fig. 4에 유한요소 해석 결과로부터 얻어진 압입률에 따른 결합력의 변화를 그래프로 도시하였다. 마찰력의 변화를 살펴보면 압입률이 증가됨에 따라 마찰력이 증가되는 반면 80% 이상에서는 증가추세가 둔화됨을 알 수 있다. 이러한 경향을 보다 심도있게 고찰하기 위해 상대적으로 마찰력이 높게 나오는 압입률 75% 이상의 결과를 대상으로 실험을 통해 제작된 제품의 이형력(separation force)을 측정하여 Fig. 5에 막대그래프로 도시하였다. 양측의 결과를 비교해보면 해석결과로 얻어진 마찰력은 압입량이 증가함에 따라 계속 증가하는 반면 측정된 이형력은 압입률이 90%일 때 감소하였음을 알 수 있다.

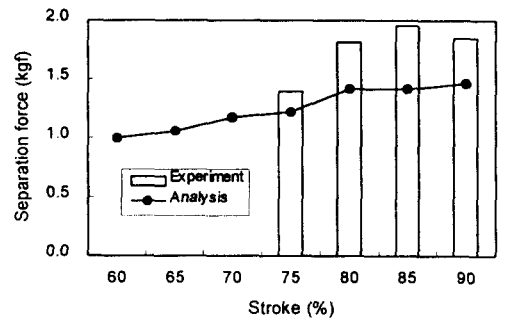


Fig. 5 Separation force wrt. embossing stroke

이러한 경향의 차이는 압입량이 증가할수록 요철부의 국부적인 두께가 감소하여 파단이 발생하였기 때문으로 분석된다. 즉 이형력의 측정시 적층된 소재간의 분리가 발생하기 이전에 파단이 발생하여 결과적으로 결합력의 저하를 유발시켰기 때문이다. 이러한 원인을 정량적으로 분석하기 위해 소재의 파단시 요구되는 전단력을 다음과 같이 정의하였다.

$$F_{crit} = 2\pi r t \tau_{crit} \quad (4)$$

여기서 r은 접촉부의 반경, t는 요철부의 최소두께이며, τ_{crit} 는 전단강도로서 인장시험을 통해 얻어진 값을 사용하였다. Fig. 6에 압입율에 따른 마찰력과 전단력의 변화를 비교하였다. 두가지

성분을 비교해보면 압입율이 85%까지는 전단력이 마찰에 의한 결합력보다 커서 적층된 소재간의 분리에 의해 이형이 발생하는 반면, 압입율이 90%인 경우에는 전단력이 마찰력보다 작아서 요철부의 파단에 의한 이형이 발생함을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 결과를 토대로 다음과 같이 이형력을 산출하였다.

$$F_{sep} = \min(F_{fric}, F_{crit}) \quad (5)$$

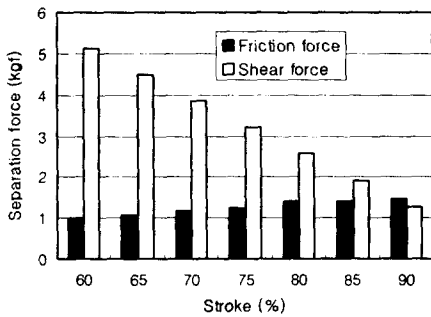


Fig. 6 Friction force vs. shear force

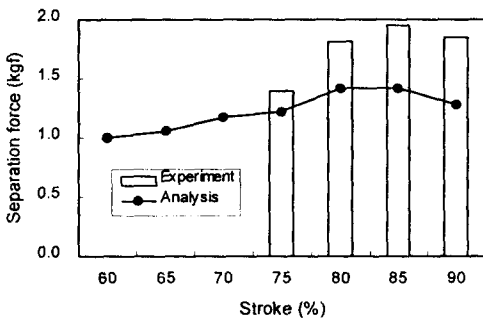


Fig. 7 Comparison of separation force

Fig. 7에 식 (5)에 의해 산출된 이형력을 그래프로 도시하였다. 실험 결과(Fig. 5 참조)와 비교할 때 80~85% 정도에서 최대값을 보여 실제 결과와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.

4.2 적층시 편차량에 따른 결합력 예측

실제로 순차 이송 금형을 사용하여 제품을 제작할 경우 가공상의 공차나 조립 공차 등으로 인

해 적층부위의 편심이 발생하고, 이로 인해 소재간 결합력의 저하가 야기된다. 본 연구에서는 역시 유한요소 해석을 통해 적층부 동심도의 편차량이 제품의 결합력에 미치는 영향을 비교해보았다. 본 연구에서는 해석 모델을 축대칭으로 가정하였기 때문에, 엄밀한 의미에서는 편심의 고려가 불가능하다. 따라서 주어진 편차량에 대해 각각 양의 편차량과 음의 편차량으로 가정하여 해석을 수행한 후, 2가지 결과의 평균값을 사용하는 것으로 가정하였다. Table 2에 편차량을 각각 0.005mm, 0.010mm로 변화시켰을 때의 결합력과 이형력의 변화를 비교하였다. 이때 압입률은 80%로 설정하였다.

편차량(mm)		0.0	0.005	0.010
결합력 (해석)	계산값(kgf)	1.42	1.13	0.85
	비율(%)	100	79.7	59.9
이형력 (실험)	측정값(kgf)	1.81	1.44	1.08
	비율(%)	100	79.6	59.7

Table 2 Comparison of separation force

여기서 결합력은 유한요소 해석으로부터 얻어진 값을, 이형력은 실험 결과치를 사용하였고, 각각의 경우에 편차가 없을 때의 결과에 대한 상대비율을 비교하였다. Table 2의 결과를 비교해보면 계산치와 실험치 간에 20%정도의 편차가 존재하나, 편차량에 대한 상대적인 비율은 거의 유사함을 알 수 있다. 즉 편차의 편차량에 의한 상대적인 결합력의 저하를 유한요소 해석에 의해 상당히 정확한 범위 내에서 예측할 수 있었다.

5. 결론

이상으로 본 연구에서는 순차이송 금형을 사용한 모터코어 금형의 적층공정에서 소재간의 결합력을 평가하기 위해 유한요소해석을 적용하였다. 이러한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 순차이송 금형을 사용한 모터코어 적층공정의 특징을 고찰하고, 축대칭 강소성 유한요소 해석을 위한 해석 모델을 정의하였다.
- (2) 적층부위 접촉영역의 마찰력과 전단력을

유한요소 해석 결과로부터 추출하여 적층된 소재간의 결합력을 예측하였다.

- (3) 엠보싱 깊이에 따른 결합력을 비교함으로써 최적의 엠보싱 깊이를 예측하였고, 실험을 통해 이를 검증하였다.
- (4) 적층부 동심도의 편차량이 결합력에 미치는 영향을 예측하였고, 실험 결과와 유사한 경향을 보임을 입증하였다.

이러한 연구결과로부터 유한요소 해석을 사용한 모터코어의 적층부의 결합력 예측의 신뢰성을 입증할 수 있었고, 개발된 해석기법을 바탕으로 향후 유사 제품의 금형설계 과정에 적용하여 생산성 및 품질을 효과적으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) 김 세환, "Progressive 금형설계", 기진연구사, 1987.
- (2) K. Park, D. Y. Yang, and Y. S. Kang, "Precision forging design and analysis in electronics parts manufacturing", Proc. Instn. Mech. Engrs. Part B: J. Engng. Manufact. Vol. 213, pp. 11-20, 1999.
- (3) C. H. Lee and S. Kobayashi, "New Solution to Rigid Plastic Deformation using a Matrix Method", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 95, pp. 865-873, 1973.
- (4) C. C. Chen and S. Kobayashi, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression, Applications of Numerical Methods to Forming Processes", ASME, AMD., Vol. 28, pp. 163-174, 1978.
- (5) Scientific Forming Tech. Co., "DEFORM-2D: Users Manual", 1998.
- (6) 삼성 첨단기술연구소, "Press 금형 설계", 1993.