

미세폭 슬리팅 공정에서 유한요소해석을 이용한 성형 정밀도 예측

홍석관¹ · 이병문² · 강정진¹ · 김종덕¹

한국생산기술연구원, (주)우주일렉트로닉스
(2008. 3. 17. 접수 / 2008. 5. 23. 채택)

Prediction of forming accuracy using FEM analysis in slitting process for connector terminal with micro width

Seok-Kwan Hong · Byung-Moon Lee · Jeong-Jin Kang · Jong-Deok Kim

1. Korea Institute of Industrial Technology, 2. UJU Electronics Co. Ltd.

(Received March 17, 2008 / Accepted May 23, 2008)

Abstract : In the electronic products, connector which play a role of board-to-board connection is an essential part. The manufacture process of this connector involves slitting and bending stage. Recently, manufacturing the connector is becoming more and more difficult as miniaturization of the electronic products. In this study, FEM analysis was performed on slitting and bending process for connector terminal with micro width in order to predict the cause of inaccurate dimension of connector terminal which occurs in actual industrial spot.

Key Words : Connector terminal, Ductile fracture, Slitting, Bending, FEM, Cockcroft-Latham

1. 서 론

Fig. 1에 나타난 바와 같이 휴대폰 및 LCD에 사용되는 커넥터는 암 커넥터와 수 커넥터의 형태로 서로 결합되어 제품에 신호 및 전원 등을 연결하여 주고, 다수의 신호 체계를 작은 공간에 전달하는 역할을 한다. 또한, 커넥터는 몸통부분인 베이스(base)와 수개에서 수십개의 핀을 포함하는 단자(terminal)로 구성되어 있으며, 두 부품이 결합되어 하나의 커넥터(connector)가 된다.

이중에서 단자는 슬리팅(slitting)과 굽힘(bending)의 다단계 연속공정으로 가공되어진다. 여기서 다단계 연속공정은 트랜스퍼(transfer)방식과 프로그레시브(progressive)방식으로 구분되며, 단자가공에 있어서 후자가 전자보다 정밀가공 및 양산가공에 유리하여 단자 제작업체에서는 프로그레시브 방식을 선호하고 있다. 그러나 최근 전자제품의 소형화, 직접화로 인해 여러 가지 기능의 소자 및 신호처리 회로들의 크기가 작아지고 있고, 서로간

의 거리도 점점 짧아지고 있어 이에 따라 단자의 금속 핀들 간의 피치도 갈수록 좁아지고 있는 추세이다. 이렇게 커넥터 단자의 협피치(fine pitch)화는 기존에 프로그레시브 가공에서 발견하지 못했던 문제들이 발생되면서 커넥터 생산업체들은 기술적 어려움을 겪고 있는 실정이다.

본 논문에서는 협피치에 대응하기 위해 미세폭을 갖는 커넥터 단자의 프로그레시브 생산 공정에서 슬리팅 공정 시 발생하는 문제점을 유한요소 해석을 통해 예측해 보았다. 이를 위해 fig. 2에서와 같이 총 4 단계의 공정에서 정밀도에 가장 민감한 부분인 슬리팅공정과 후속 굽힘공정만을 대상으로 해석을 수행하였다. 또한 해석의 정밀도를 높이기 위해서 슬리팅공정 시 반드시 고려해야 하는 연성파괴모형을 실험을 통해 검증하였다.

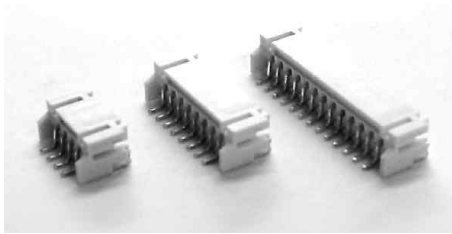
2. 슬리팅 공정 해석을 위한 모델 정의

2.1 연성 파괴 모델 정의

본 커넥터 터미널의 슬리팅 공정은 소재의 파단을 동반하기 때문에 이 공정을 유한요소법으로 해석하기 위해서는 적절한 연성파괴기준(ductile fracture criterion)과 요소제거기법(element deletion method)의 기술이 필요하다. 또한 파단 시 정확한 전단면을 묘사하기 위해서는 매우 작은 요소크기가 요구되기 때문에 계산시간을 줄이기 위해서는 적절한 요소크기를 선정해야 한다.



(a) Connector application



(b) Connector with base and terminal

Fig. 1 Application in electronic products and component of connector

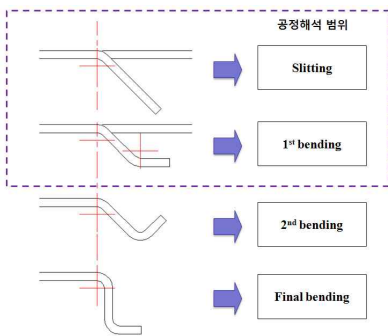


Fig. 2 Manufacture process of connector terminal

연성파괴를 예측하기 위한 기준은 일반적으로 응력과 변형률의 적분형태로 나타내며, 적분된 값이 임의의 값에 도달하게 되면 연성파괴가 시작한다고 가정한다. 이때 연성파괴가 일어나는 기준은 여러 이론으로부터 결정되어진다. 이중에 대표적인 연성파괴 기준 이론은 McClintock, Oyane, Cockcroft-Latham 그리고 Osakada-Mori 등이 있다. McClintock 모델은 파괴가 일어나는 과정을 기공생성 및 성장에 근거를 둔 이론이고[1], Oyane 모델은 다공질 재료에 대한 연성파괴기준을 제시한 이론이며[2], Cockcroft-Latham은 파괴시 소성변형률 경로에 대한 최대 주인장응력의 영향을 고려한 모델이고[3], 마지막으로 Osakada-Mori 모델은 비틀림 시험 결과를 이용하여 연성파괴 예측을 위한 파괴 기준식 유도한 이론이다[4].

본 연구에서는 다양한 하중조건에 적용될 수 있는 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준을 적용하였으며, 다음과 같은 식으로 표현된다[5].

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

여기서 σ^* 는 최대 주응력이며, $\bar{\epsilon}_f$ 는 파괴시 변형률, C 는 Cockcroft-Latham 상수이다. 수치해석 시 상기의 식으로 소재의 전 영역에 대하여 각 요소의 적분점에서 계산된다. 변형 경로의 각 스텝에서 계산된 절점의 속도와 시간 증분으로 절점좌표가 변화되고, 유효변형률은 변형 경로에 따라 적분된다. 변형 경로의 각 스텝에서 응력장과 변형률장은 파괴 여부의 판단을 위해 Cockcroft-Latham의 연성파괴기준을 계산하는데 이용된다. 변형의 전 공정동안 식(1)의 값은 누적되고, 이와 같이 누적된 값이 C 의 값을 초과 했을 때 연성파괴가 일어나는 것으로 간주하고 해당 요소를 제거하면서 파괴 해석이 진행된다.

보통 소재의 전단(또는 slitting) 시 fig. 3과 같은 전단면 형상을 갖는다. 그림에서 볼 수 있듯이 전단면은 roll-over, burnish zone, fracture zone, burr영역으로 구분된다. 여기서 roll-over와 burnish zone은 소성변형으로 형성되며, fracture zone과 burr는 연성파괴로부터 형성된다. 또한, 파괴가 시작되는 시점에 따라 이들 영역의 비율이 결정된다. 이처럼 파괴의 시점은 바로 연성파괴 기준값, C 에 의해 결

정된다.

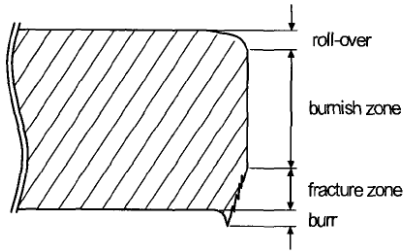


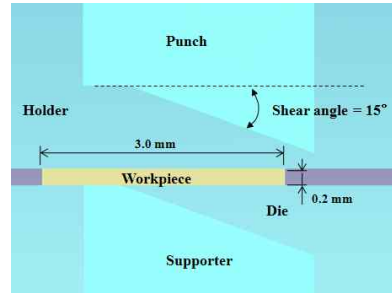
Fig. 3 Shape of shear plane after slitting

2.2 연성 파괴 유한 요소 해석

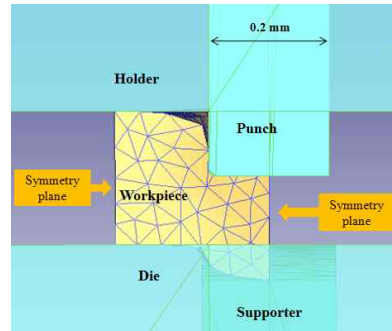
전단면 영역들의 정확한 비율을 예측하기 위해서는 실험값과 비교하면서 C값을 구해야 한다. 본 연구에서는 상용프로그램인 DEFORM-3D를 사용하여 연성 파괴 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 적용된 물성치는 커넥터 터미널의 소재인 PB(Phosphor Bronze) strips이며, 자세한 수치는 table 1에 나타내었다. 또한, C값을 150, 1500, 3000 MPa로 변화시키면서 fig. 4와 같이 실제 슬리팅공정의 금형 형상을 모델링하였으며, 30,000개의 element를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석결과를 살펴보면 fig. 5(a)의 C=150MPa 일때는 슬리팅공정이 진행되면서 파괴되는 시점이 너무 빨라서 전단면의 모든 영역에서 fracture zone이 형성되었다. fig. 5(b)는 C=1500MPa 일때의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것인데 적절한 비율의 파단영역이 형성된 것을 볼 수 있다. 마지막으로 fig. 5(c)에 나타낸바와 같이 C=3000MPa 일때는 파단되는 시점이 너무 지연되어 버(burr)가 심하게 형성된 것을 볼 수 있다.

Table 1. Mechanical properties of Phosphor Bronze

Property Item	Phosphor Bronze	Unit
Modulus of Elasticity	110	GPa
Ultimate Tensile Strength	672	MPa
Poisson's Ratio	0.3	
Yield Tensile Strength	358	MPa
C	150	MPa
	1500	
	3000	

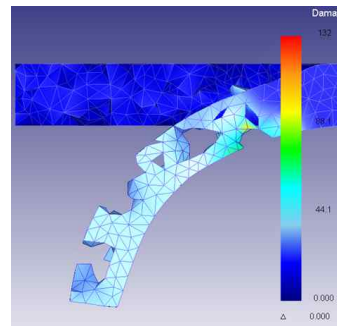


(a) Side view

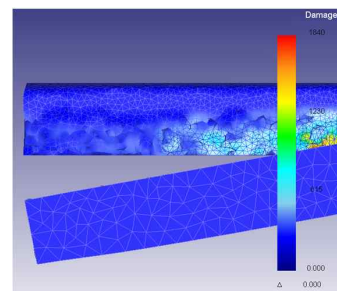


(b) Front view

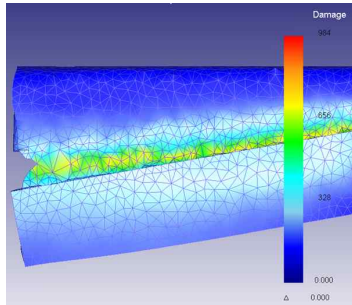
Fig. 4 Finite element model



(a) C=150MPa



(b) C=1500MPa



(c) C=3000MPa

Fig. 5 Change of deformed shape depending on Cockcroft-Latham coefficient

2.3. 연성 파괴 해석 모델의 검증

상기의 해석으로부터 C=1500MPa 일때 적절한 전단면 영역 비를 얻을 수 있었다. 이를 대상으로 해석의 정확도를 정량적으로 평가하기 위해 실제 실험결과의 사진과 비교하였다. 실제 실험으로부터 얻은 전단면의 비는 roll-over는 전체 전단면의 20%를 차지하였으며, burnish 영역은 30%, fracture 영역은 50%를 차지하였다. burr영역은 거의 확인되지 않았다.

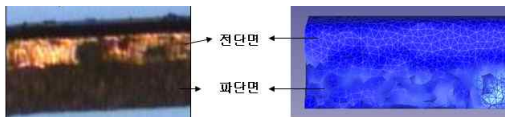


Fig. 6 Comparison between the shear plane of experiment and simulation

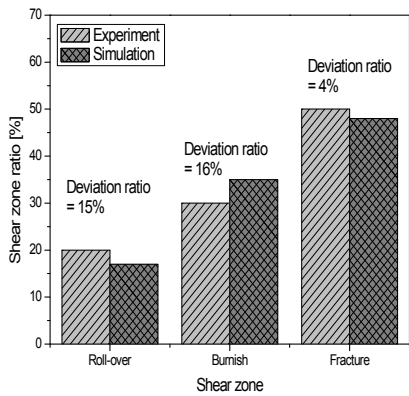


Fig. 7 Measurement of shear plane

한편 해석결과로부터 측정된 전단면영역의 비는

roll-over가 17%, burnish영역이 35%, fracture영역이 48%를 보였다. 해석의 정확도를 정량적으로 나타내면, roll-over에서 85%, burnish 영역에서 84%, fracture영역에서 96%의 정확성을 보였다.

따라서 상기의 연성파괴 모델을 바탕으로 커넥터 터미널의 슬리팅 공정해석을 수행하였다.

3. 커넥터 터미널의 순차 프레스 공정 해석

커넥터 터미널의 순차 프레스 공정은 먼저 슬리팅공정을 수행한 뒤 이어서 굽힘 공정을 수행하기 때문에 2가지 공정의 금형을 따로 분리하여 모델링하여야 한다. 따라서 먼저 전단각이 15도인 펀치로 슬리팅공정 해석을 수행한 후 이어서 굽힘공정 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 연성파괴모델은 cockcroft-latham식을 사용하였으며, 임계파괴기 준값인 C는 상기의 해석으로부터 결정된 1500MPa을 적용하였다.

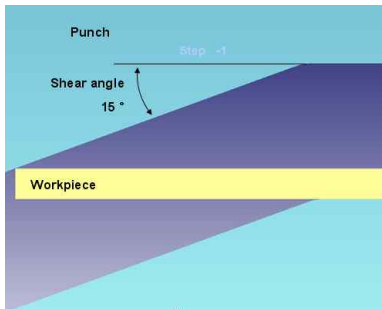
3.1 슬리팅 공정 해석 및 결과

먼저 해석결과를 명확하게 구분하기 위해 편의상 펀치(punch)와 지지대(supporter)만 그림 상에 나타내었다. fig. 8을 살펴보면 펀치가 아래로 내려오면서 slitting되는 모습을 확인할 수 있다. 또한 슬리팅된 후 전단면의 형상도 일정하게 유지가 되는 것도 알 수 있다. 최종적으로 스트로크(stroke)가 100% 진행된 상태를 fig. 8(c)에서 확인할 수가 있는데 펀치가 소재의 두께인 2.0mm만을 남기고 완전하게 내려왔는데도 불구하고 펀치와 소재사이에 공극이 생겨 마치 공정이 덜 진행된 것처럼 보이지만 이는 소재가 슬리팅될 때 roll-over와 burnish 영역을 형성하면서 소성변형을 일으켰기 때문이다. 결과적으로 처음 소재의 두께보다 얇아지는 문제가 발생하였으며, 이러한 thinning 현상은 소재의 두께 대비 폭이 작아질수록 심화될 것으로 예상된다.

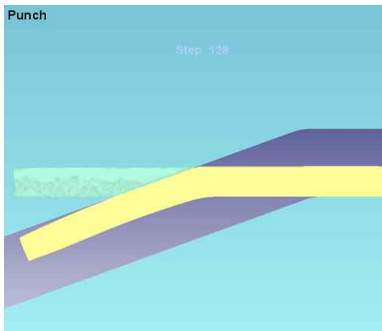
3.2 굽힘 공정 해석 및 결과

순차 프레스 공정에서는 슬리팅공정에 이어서 굽힘공정이 진행된다. 굽힘공정을 해석하기 위해 fig. 9(a)와 같이 슬리팅공정에서 얻은 결과를 초기 모델로 사용하여 굽힘 공정해석을 수행하였다. 여기서 초기 형상을 살펴보면 슬리팅공정이 완료된

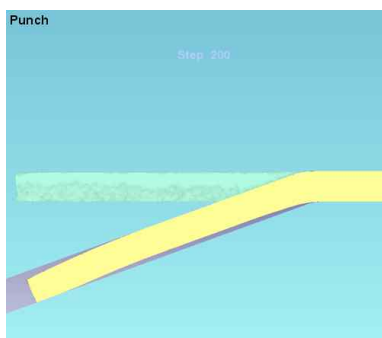
상태이지만 소재는 여전히 전단되지 않은 영역이 남아있음을 볼 수 있다. 이와 같은 이유로 fig. 9(b)에서와 같이 굽힘공정 초기에 펀치의 변곡점 부근에서 국부적인 응력이 발생하게 되고, 이로 인해 소재의 표면에 압흔을 남기게 되어 형상정밀도에 좋지 않은 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.



(a) Initial tool position

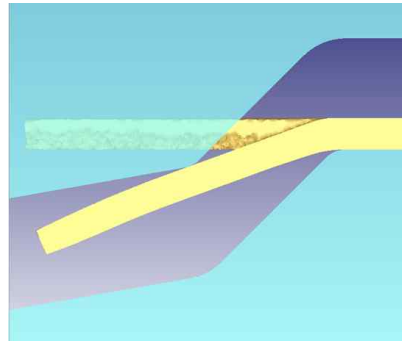


(b) stroke 50%

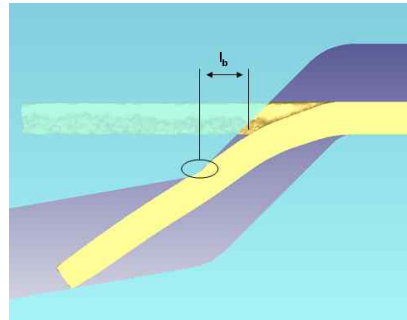


(c) stroke 100%

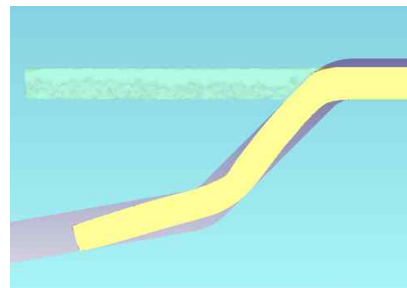
Fig. 8 Simulation result of slitting process



(a) Initial tool position



(b) stroke 10%

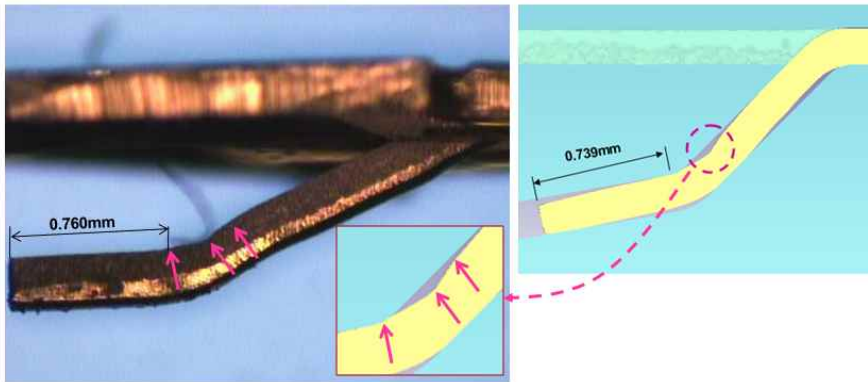


(c) stroke 90%

Fig. 9 Simulation result of bending process

3.3 커넥터 터미널의 순차 프레스 공정 후 성형 정밀도 평가

실제 실험결과와 순차 프레스 공정의 해석 결과를 비교해보면 먼저 슬리팅공정에서 fig. 10(a)와 같이 전단면영역에서 fracture zone과 burnish의 비율이 실험결과와 유사하게 형성되었음을 알 수 있다. 본 성형품의 단계는 슬리팅 후 굽힘공정의 첫 번째 단계이므로, 다음 굽힘 공정 단계의 굽힘각 위치를 정확하게 일치하기 위해서는 소재 끝의 직선부 길이가 일정하게 유지되어야 한다. 따라서 본 직선부 길이를 주요설계인자로 볼 수 있다. 설계상의 직선



(a) Experiment result

(b) Simulation result

Fig. 10 Comparison between the deformed shape of experiment and simulation after progressive slitting process

이는 0.760mm이며, 해석으로부터 예측된 길이는 0.739mm로 실험과 해석결과 모두 설계상의 치수보다 직선부의 길이가 증가한 것을 알 수 있다. 또한, 변곡점 부근에서의 형상이 매끄럽지 못하고 심하게 변형된 것도 실험결과와 유사하게 예측되었다.

본 연구는 부품소재기술개발사업의 “초정밀 극세 (0.9T) Connector (0.3FPC, 0.4BTB) 금형의 최적 설계 및 표면 처리기술 개발” 과제 및 “2010 생산기반혁신기술개발사업”의 일환으로 수행되었으며, 이에 해당 사업을 지원해주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

4. 결론 및 향후 연구

(1) 슬리팅 공정해석의 정밀도를 높이기 위해 연성파괴기준값을 실험결과와 비교하여 구하였으며, 이때의 실험결과와 가장 유사한 Cockcroft-Latham 상수는 1500MPa이 었다.

(2) 최종 결정된 연성파괴기준값을 적용하여 해석한 결과 실험값과 비교하여, roll-over에서 85%, burnish 영역에서 84%, fracture영역에서 96%의 정확성을 보였다.

(3) 커넥터 터미널의 순차 프레스 공정 해석 결과 직선부 길이가 0.739mm로 예측되었고, 실험결과와 0.02mm의 편차를 보였다.

(4) 최종 성형 후 소재의 변곡점 부근에서 발생하는 압흔도 실험결과와 유사하게 예측되었다.

(5) 본 연구로부터 검증된 연성파괴모델을 활용하여 헵피치를 갖는 커넥터 터미널의 성형정밀도를 향상시킬 수 있는 금형설계를 수행할 예정이다.

후기

참고문헌

- (1) F. A. McClitock, 1968, "A criterion for ductile fracture by the growth of hole", J. Appl. Mech., p363.
- (2) M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto and S. Shima, 1980, "Criteria of ductile fracture and their application", J.Mech. Work. Tech., p65.
- (3) M. G. Cockcroft and D. J. Latham, 1968, "Ductility and the workability of metals", J. Inst. Metals., p33.
- (4) Osakada, K. and Mori, K., 1978, "Prediction of ductile fracture in cold forging", Annals of CIRP, Vol. 27, No. 1, pp. 135~139
- (5) Somnath Ghosh, Mign Li, Aniruddha Khadke, 2005, "3D modeling of shear-slitting process for aluminum alloys", Journal of Materials Processing Technology 167, pp. 91~102.