

싱글 클린칭 공정에서 소재간 마찰이 축방향 분리력에 미치는 영향

이득원¹ · R. Sekar² · 이찬주³ · 전만수[#]

Influence of Friction Between Materials on the Axial Direction Pull Force in Single Clinching

D. W. Lee, R. Sekar, C. J. Lee, M. S. Joun

(Received March 30, 2021 / Revised April 2, 2021 / Accepted April 5, 2021)

Abstract

In this paper, a parametric study on the influence of friction between materials on pull force in single clinching is conducted using an axisymmetric elasto-plastic finite element method and law of Coulomb friction. An appropriate finite element analysis model is given, which minimizes the effect of the material model and numerical factors including the number of quadrilateral finite elements and blank radius. It is emphasized that the elasto-plastic material model should be employed because the elastic deformation of the internal region is affected more by the pull force. It has been shown that the pull force increases as friction coefficient increases and that the optimized friction coefficient is around 0.4, which is qualitatively comparable with its theoretical value. When the friction coefficient reaches 0.5 in the example studied, the neck fracture is predicted.

Keywords : Single Clinching, Pull Force, Friction Effect, Elasto-Plastic Finite Element Method

1. 서론

클린칭(Clinching)은 판재의 기계적 결합 공정으로 나뉠의 장점을 지니고 있으며, 이에 관한 연구는 지속적으로 증가하는 추세에 있다[1].

K. Mori 등[2]은 기계적 클린칭이 타 방법에 비하여 피로강도 측면에서 우수하다는 연구결과를 발표하였다. Coppieters 등[3]은 분리력에 관한 실험적 및 수치적 연구를 실시하였으며, 축방향의 분리력이 축방향의 분리력보다 작다는 것을 보였다.

다수의 연구자들[4-8]이 해석적, 수치적 방법을 통하여 금형의 형상변수가 클린칭 중 소재의 변형형

상, 즉 목두께(neck thickness)와 언더컷(under-cut)에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

클린칭에 관한 연구의 궁극적 종착역은 최대의 분리력이다. 최근 들어 다수의 연구자들[8-11]이 분리력의 극대화를 위한 연구를 수행하였다. Lee 등[8]은 클린칭 금형의 설계를 위한 새 방법을 제안하였으며, 해석적 및 실험적 방법으로 그 타당성을 입증하였다.

그러나 아직 클린칭 공정은 해석 및 설계 양면에서 불확실성과 많은 난제를 안고 있다[12,13]. 일부의 학자는 강소성의 타당성을 주장하였으나, 클린칭 연구의 종착역인 분리력 측면에서 타당성이 떨어진 다. 왜냐하면, 분리 과정에서 탄성변형의 영향을 무시할 수 없기 때문이다. 마찰의 영향이 매우 크지만, 이에 관한 연구가 미흡하다. 그리고 형상적으로는 단순하지만 해석적으로 실험 방법을 그대로 반영하는데도 한계가 있다. 공정의 특성상, 유한요소해석

1. 경상대학교 기계항공공학부, 대학원생
2. ㈜엠에프알씨 기술연구소, 주임연구원
3. 한국생산기술연구원 정밀기계공정제어연구그룹, 수석연구원
Corresponding Author : School of Mechanical Engineering/Engineering Research Institute, Gyeongsang National University
E-mail : msjoun@gnu.ac.kr. ORCID : 0000-0003-1678-5415

시 다수의 요소망 재구성이 이루어져야 하는 등 수치적 영향과 재료 모델의 영향 등에 관한 정량적 규명이 부족하다[14].

클린칭 공정에서 주요 고려사항 중의 하나는 접합될 소재 간의 마찰이다. 이에 관하여 중점적으로 연구한 결과는 찾기가 쉽지 않다. 대부분의 연구[3, 7, 8, 13]에서 쿨롱마찰법칙과 0.4의 마찰계수를 사용하였다. 그러나 그 근거를 제시한 연구결과는 없다. 분리력의 수치적 예측 측면에서 볼 때, 일정전단마찰이 부적절하다.

이 논문에서는 문헌으로부터 발굴된 싱글 클린칭 공정을 대상으로 분리력의 평가에 적합한 유한요소 해석 모델을 해석결과의 분석을 통하여 확립하고, 이를 이용하여 접합된 재료 간의 마찰조건이 축방향 분리력에 미치는 영향을 밝히고자 한다.

2. 분리력 예측에 적합한 유한요소해석 모델

Fig. 1 은 싱글 클린칭 공정을 개념적으로 나타내고 있다. 이것은 TOX[15]의 상용화된 클린칭 공정을 바탕으로 설계된 것이다.

클린칭 공정은 두 겹의 소재를 두고 펀치로 가압함으로써 드로잉과 단조가 동시에 이루어지는 성형결합공정이다. 이 연구에 사용되는 재료는 Al6061이며, 이것의 기계적 성질을 Table 1에 요약하였다

Table 1 Mechanical properties of Al6061

Yield strength(MPa)	196.2
Tensile strength(MPa)	254.4
Young's modulus	68.9
Poisson's ratio	0.33

판재의 두께는 2.0mm 이며 특별한 언급이 없는 경우에는 소재와 금형 사이의 마찰계수는 0.12, 소재와 소재 사이의 마찰계수는 0.4 로 가정하였다[7,16].

일반적으로 클린칭 공정에서 스트로크에 해당하는 금형 밀면과 펀치 사이의 거리(Fig. 1 의 X)는 성형 전 소재 두께의 40% 이하로 설정한다[4]. 이 논문에서는 성형 전 소재 두께의 30%가 되는 1.2mm 지점까지 소재를 가압하도록 스트로크를 제한하였다 [7].

클린칭 공정의 특징은 목두께와 언더컷이며 이것을 적절하게 성형하기 위한 금형 및 관련 장치에 의하여 클린칭 공정이 결정된다. 싱글 클린칭 공정의 금형이 축대칭이고, 그 영향권에 속하는 소재를 축대칭으로 가정할 수 있으므로 싱글 클린칭을 역학적으로 축대칭 공정으로 가정하였다. 그리고 그 해석 도구로 특별한 언급이 없으면 탄소성 축대칭 유한요소법을 사용하였다.

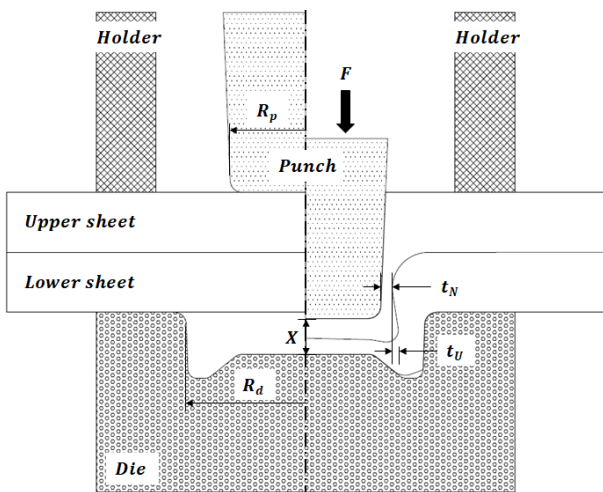


Fig. 1 Clenching setup

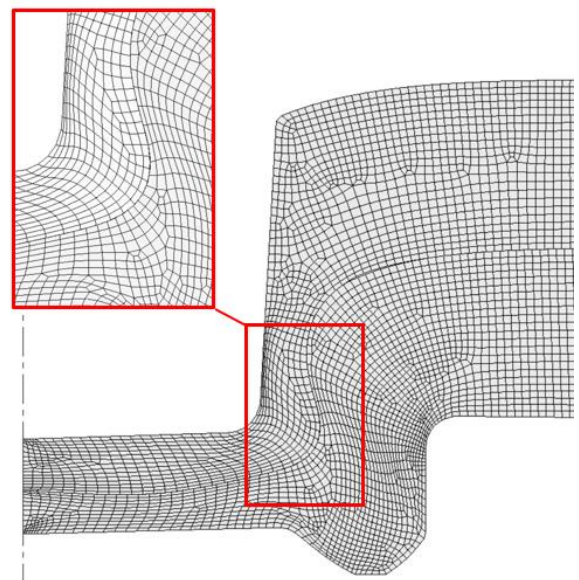


Fig. 2 Optimized mesh system with excellent mesh regularity for clenching process simulation

분리력의 예측 측면에서 볼 때, 접촉면에서 큰 상대변위의 미끄러짐이 발생한다. 따라서 접촉면에서의 요소 품질은 중요하다. 이 연구에 사용된 사각형 요소망은 h -법과 r -법에 근거하여 최적화되었다[17]. 그 결과, Fig. 2 에서 보는 바와 같이 소재 간의 접촉면에서 요소의 직각도가 건전하게 유지되는 특징이 있다. 이것은 해석결과의 정확도에 우호적인 영향을 미친다[17].

클린칭 공정과 분리력 시험을 연속된 공정으로 자동해석이 될 수 있도록 공정해석 모델을 구성하였다. 이것은 향후의 최적화 등을 고려한 것으로 Fig. 3 에 그 개념을 나타내었다. 이 때, 소재의 반경이 충분히 크되, 해석결과에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 작을수록 유리하다. 그리고 요소의 수도 해석결과에 영향을 미친다. 요소 수가 클수록 요소망 재구성의 회수가 증가하여 해석결과에 부정적 영향을 미치기 때문에 적절한 수의 요소를 사용하는 것이 바람직하다. 클린칭 공정에서 재료의 소성변형이 매우 크게 발생하기 때문에 요소망 재구성은 불가피하다. 반면, 분리력 평가 공정에서 결과의 정확도에 악영향을 미치는 요소망 재구성은 강제적으로 실시하지 않았다.

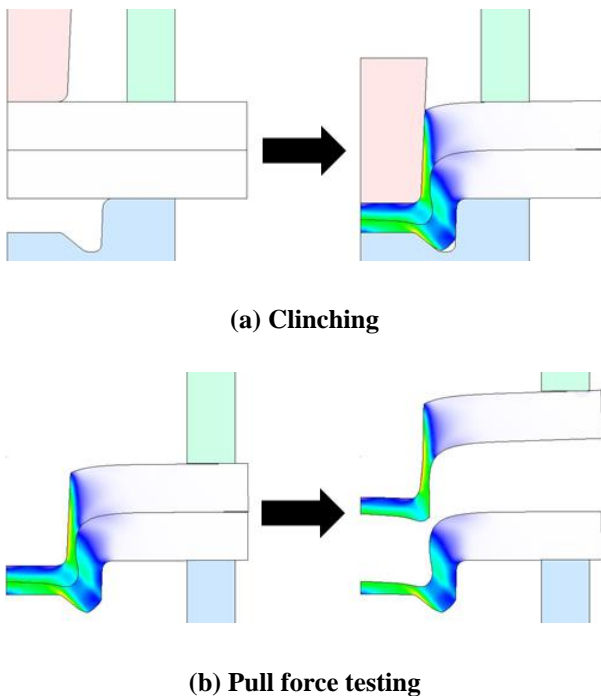
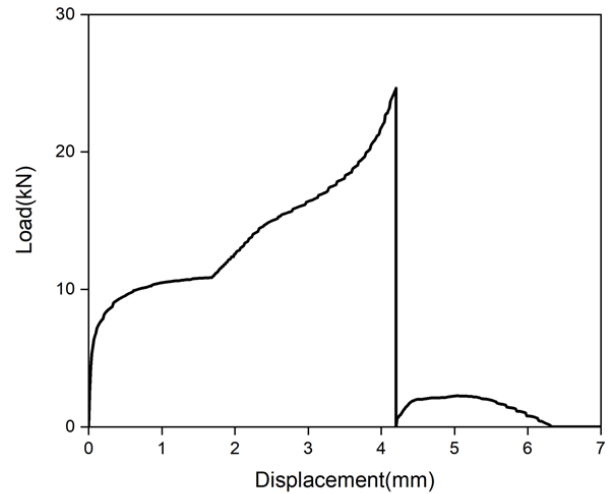
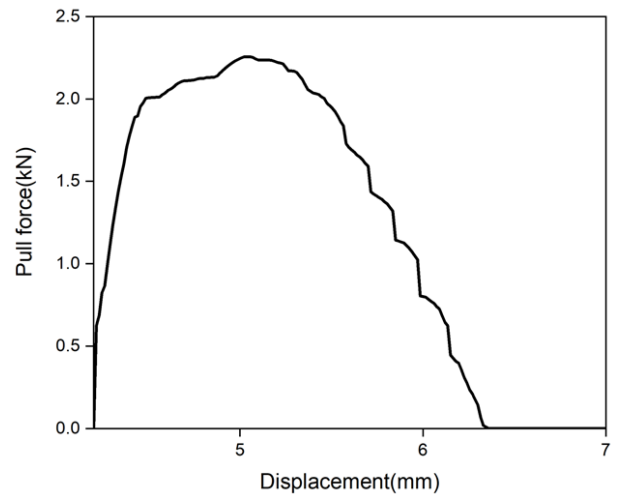


Fig. 3 Definition of the test process

분리력 평가 공정은 가상의 공정으로 Fig. 3(b) 에서 보는 바와 같이 두 개의 축대칭 환상 금형에 접촉한 소재가 금형으로부터 분리되지 않는다고 가정 한 상태에서 두 환상 금형이 멀어지는 방향으로 속도 또는 변위를 부과하였다. 이 분리력 평가 공정은 현실적으로 이루어지기 어려운 것이지만, 가상의 설계 모델로는 적절하다고 판단하였다. 시뮬레이션의 수치적 안정성을 위해 금형을 소재 끝단에 맞추지 않고 안쪽으로 약간 들어가게 설계하였다.



(a) Clinching load and pull force



(b) Detailed pull force

Fig. 4 Clinching load and pull force

최적의 해석모델을 최종 결정하기에 앞서, 소재 반경 10mm 와 요소 수 3000 개의 조건 하에서 마찰계

수 $\mu=0.4$ 에 관하여 구한 탄소성 유한요소해석 결과, 즉 변형형상과 유효변형률을 Fig. 3 에 나타내었고 성형하중 및 분리력 곡선을 Fig. 4 에 나타내었다.

Fig. 4 에서 보는 바와 같이 분리력은 최대 클린칭 하중의 1/10 정도이며, 분리력은 스트로크의 증가와 함께 급격하게 증가하다가 갑자기 완만한 증가세를 유지한 후 다소 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 최대의 분리력은 약 1mm 의 스트로크 이후 발생하였다. Fig. 4(b) 에서 분리력이 단속적으로 감소하는 이유는 절점의 분리가 불연속적으로 발생하기 때문이다.

Table 2 Variation of neck thickness, under-cut and pull force with radius of material

Material radius	Neck thickness	Under-cut	Pull force
7mm	0.3598	0.1152	2.2418
8mm	0.3592	0.1188	2.2743
9mm	0.3575	0.1211	2.2901
10mm	0.3572	0.1162	2.2563
11mm	0.3586	0.1212	2.3420

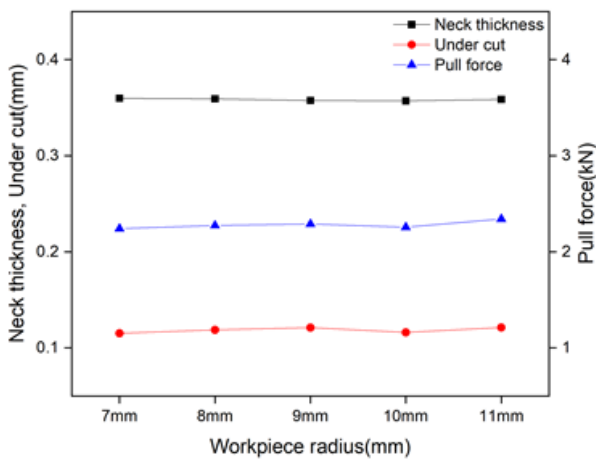


Fig. 5 Effect of blank size on the neck thickness, under-cut and pull force

클린칭 공정에서 소재의 크기가 해석결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 소재의 반경을 7mm 부터 11mm 까지 1mm 씩 증가시켰으며, 요소 수도 소재 면적에 따라 증가시키며 유한요소해석을 실시하였다.

소재 크기의 변경에 따른 목두께, 언더컷, 분리력 등을 Table 2 와 Fig. 5 에 나타내었다. 이 결과로부터 시험에 사용된 범위의 소재의 크기가 해석결과에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 확인하였다.

Table 3 Variation of neck thickness, under-cut and pull force with number of elements

No. of elements	Neck thickness	Under-cut	Pull force
2000	0.3489	0.1157	2.2334
2500	0.3574	0.1134	2.2603
3000	0.3572	0.1162	2.2563
3500	0.3536	0.1240	2.2796
4000	0.3568	0.1252	2.3156

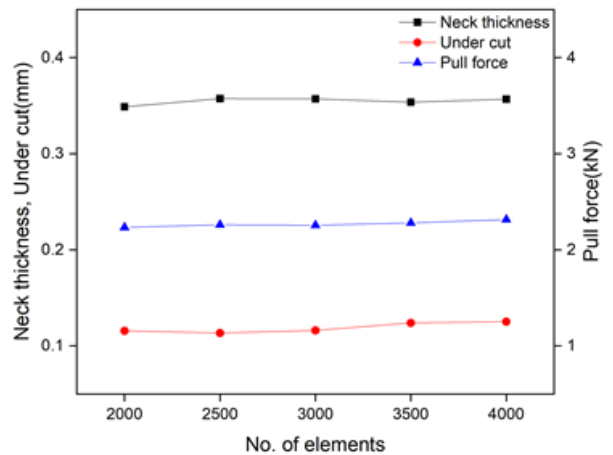


Fig. 6 Effect of number of quadrilaterals on the neck thickness, under-cut and pull force

요소 수가 분리력에 미치는 영향을 알아보기 위해 소재의 반경을 10mm 로 설정하고 요소 수를 2000 개 부터 4000 개까지 500 개씩 증가시키며 유한요소해석을 실시하였다. 사각형 요소 수의 변경에 따른 목두께, 언더컷, 분리력 등을 Table 3 과 Fig. 6 에 나타내었다. 이 결과로부터 요소 수가 해석결과에 민감하게 작용하지 않는 것을 확인하였다

소재와 금형 사이의 마찰이 목두께, 언더컷, 분리력 등에 대해 미치는 영향을 알아보기 위해 소재의 크기를 10mm 로, 요소 수를 3000 개로 설정하고 소재와 금형간 마찰계수를 0.04 부터 0.2 까지 0.04 씩

증가시키며 유한요소해석을 실시하였다. 마찰계수의 변경에 따른 목두께, 언더컷, 분리력 등을 Table 4 와 Fig. 7 에 나타내었다. 이 결과로부터 소재와 금형 사이의 마찰이 목두께, 언더컷, 분리력 등이 모두 점증하는 것을 확인하였지만, 적절한 마찰계수를 사용할 경우, 그 값의 변화를 5% 이내로 낮출 수 있으므로 그 영향이 상대적으로 적음을 알 수 있다.

Table 4 Variation of neck thickness, under-cut and pull force with friction between materials and dies

Friction coefficient	Neck thickness	Under-cut	Pull force
0.04	0.3479	0.1092	2.1425
0.08	0.3522	0.1134	2.1675
0.12	0.3572	0.1162	2.2563
0.16	0.3569	0.1253	2.3485
0.20	0.3636	0.1263	2.3432

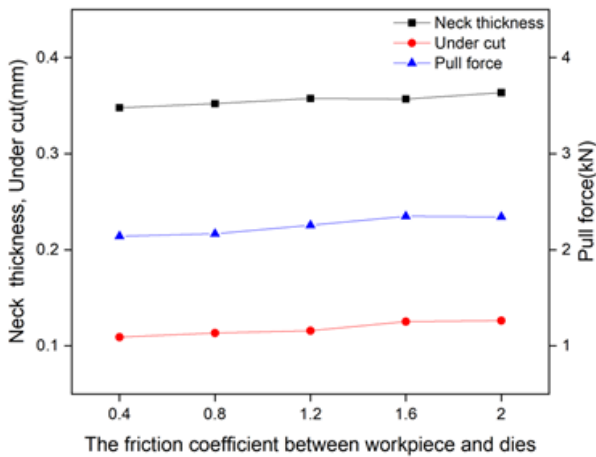


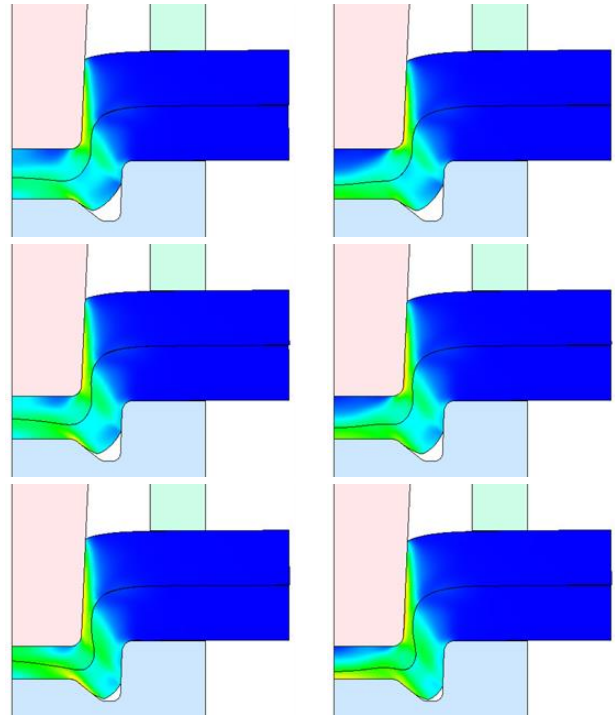
Fig. 7 Effect of friction coefficient between materials and dies on the neck thickness, under-cut and pull force

펀치와 소재가 닿는 부위의 마찰과 금형과 소재가 닿는 부위의 마찰이 서로 다를 때, 발생하는 현상을 살펴 보았다. 이 목적으로 소재의 크기를 10mm, 요소 수를 3000 개로 설정하였다. 첫 번째의 해석조건으로 펀치와 소재가 닿는 부위를 무마찰로 간주하고 금형과 소재가 닿는 부위에 마찰계수 0.12 로 설정하였다. 두 번째의 해석 조건으로 금형과 소재가 닿는

부위에 무마찰을 적용하고 펀치와 소재가 닿는 부위에는 마찰계수 0.12 을 적용하였다. 이 두 개의 조건에 관하여 유한요소해석을 실시하였다.

Table 5 Effect of extreme frictional conditions on neck thickness, under-cut and pull force

Extreme friction status	Neck thickness	Under-cut	Pull force
Punch-frictionless	0.3611	0.1059	2.1246
Die-frictionless	0.3344	0.1154	2.1888



(a) Punch, frictionless

(b) Die, frictionless

Fig. 8 Comparison of history of deformation

Table 5 에서 정리한 결과로부터 목두께, 언더컷, 분리력에 큰 영향을 미치지 못했지만 펀치와 소재가 닿는 부위에 무마찰 조건을 적용한 경우 목두께가 증가하고 언더컷이 감소하는 것을 확인하였으며, 금형과 소재가 닿는 부위에 무마찰 조건을 적용한 경우 목두께가 감소하고 언더컷이 증가하는 것을 확인하였다. 그리고 Fig. 8 에 보이는 바와 같이 펀치와

금형 바닥면 사이에 소재 유동의 차이, 즉 소재의 뚜렷한 두께 차이가 확인되었다. 그러나 Table 5 에서 보는 바와 같이 분리력 측면에서는 큰 변화는 없었다. 전술한 마찰에 관한 수치 결과의 분석은 소재 간의 마찰의 영향을 분석하기 위해서 선행한 것이다.

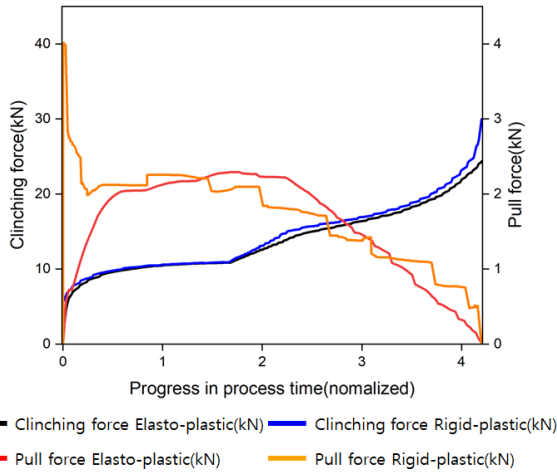


Fig. 9 Comparison of clinching force and pull force between elasto-plastic and rigid-plastic FE predictions

마지막으로 재료모델의 영향을 분석하였다. 재료는 변형률속도 및 온도에 무관하다고 간주하여 강소성 또는 탄소성으로 가정하였다. 이 두 가지의 재료 모델이 동일한 공정조건 하에서 예측한 성형하중 및 분리력의 예측결과를 Fig. 9 에 나타내었다.

클린칭 공정의 성형하중의 차이는 무시 가능한 수준이다. 그러나 분리력의 차이는 매우 크며 그 원인은 다음의 두 가지로 분석된다. 강소성의 경우, 분리력의 초기값에서 보는 바와 같이 스프링백 등의 영향이 전혀 고려되지 않았고 수치적 점프가 발생했음을 보여주는 반면, 탄소성의 결과는 처음에는 0의 분리력에서 시작하여 급격한 증가세를 보이다가 완만한 상승이 비교적 장기간 지속된다. 분리력은 최대값을 찍은 후 강소성에 비하여 상대적으로 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 두 재료모델 모두 초기의 점프를 제외했을 때, 최대 분리력의 차이는 크지 않다. 그러나 수치적 안정성을 고려하고 분리 시에 발생하는 탄성변형의 영향을 감안할 때, 결론적으로 탄소성 유한요소법이 현실에 가까울 수밖에 없다.

지금까지 분석결과들로부터 수치적 특성이 비교적

안정적이며 사각형 요소 수도 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 따라서 최적의 유한요소모델을 위하여 반경과 사각형 요소의 수를 각각 10mm 와 3000 개로 설정하였다. 그리고 금형과 소재의 마찰도 다수의 문헌을 참고하여 0.12 로 가정하였다. 결론적으로 싱글 클린칭 공정과 분리력 평가 공정의 수치 해석적 특성이 양호하다.

3. 마찰이 분리력에 미치는 영향과 최적 마찰조건

소재와 소재 사이의 마찰이 목두께, 언더컷, 분리력 등에 대해 미치는 영향을 살펴보기 위해 앞 절에서 구한 최적의 유한요소해석 조건들을 사용하였다.

Table 6 Variation of neck thickness, under-cut and pull force with friction between materials

Friction coefficient	Neck thickness	Under-cut	Pull force
Frictionless	0.2875	0.1761	0.9672
0.1	0.3369	0.1181	1.1017
0.2	0.3485	0.1202	1.5432
0.3	0.3483	0.1260	1.9428
0.4	0.3572	0.1162	2.2563
0.5	0.3569	0.1193	2.4381

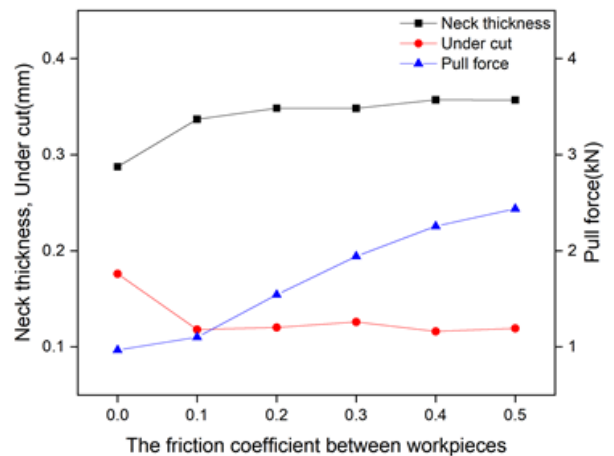
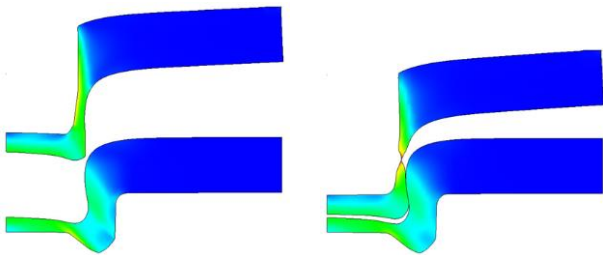


Fig. 10 Effect of friction coefficient between workpieces on the neck thickness, under-cut and pull force

소재 사이의 마찰조건으로 쿨롱마찰계수 0.0(무마찰), 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 를 선정하여 유한요소해석을 실시하였다. 해석결과를 Table 6 과 Fig. 10 에 나타내었다. 소재 간 마찰 조건을 적용한 것과 무마찰 조건의 결과를 비교했을 때, 마찰을 적용한 경우에 목두께가 증가하고 언더컷이 감소했다.



(a) Friction coefficient 0.4 (b) Friction coefficient 0.5

Fig. 11 Comparison of history of deformation

그러나 마찰계수의 증가와 함께 분리력은 꾸준히 증가한 것을 확인할 수 있다. 결론적으로 마찰계수의 증가에 따라 목두께와 언더컷은 크게 영향을 받지 않았지만 분리력이 점증하는 것을 확인할 수 있다. 특히 마찰계수 0.2 전후에서 분리력의 증가가 눈에 띈다. 하지만 Fig. 11 에서 나타난 것과 같이 소재 간 마찰계수가 증가함에 따라 분리력이 증가하지만, 마찰계수 0.5 에 이르면, 목 부분에서 파단이 발생한다.

4. 결론

이 논문에서는 싱글 클린칭 공정의 고정도 해석에 적합한 유한요소해석 모델을 제시하였으며, 이를 이용하여 소재 간의 마찰조건이 분리력에 미치는 영향을 분석하였다.

그 결과, 클린칭 공정 그 자체는 유한요소해석 관점에서 수치적으로 비교적 안정적인 해를 예측하며, 매우 폭넓은 크기의 반경이 안정적인 해를 예측하며, 요소의 수도 매우 넓은 범위에서 안정적인 결과를 낳았다. 싱글 클린칭 공정에서 재료와 금형 간의 마찰계수도 해석결과에 예측 가능한 정도의 영향을 미쳤다. 그러나 검토된 탄소성 및 강소성의 재료모델은 클린칭 공정 그 자체에는 큰 영향을 미치지 않았지만, 분리력 평가 공정에서는 뚜렷한 차이를 보였다.

이것은 강소성이 분리력 시험에서 발생하는 탄성변형을 반영하는데 부족함이 있음을 암시하는 결과이다. 왜냐하면, 분리력 공정은 재료 전체의 탄성변형을 야기시키며 이것은 최종 재료의 분리 순간의 형상에 다소의 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

최적의 유한요소해석 모델을 사용하여 소재 간 마찰이 분리력에 미치는 영향을 분석한 결과, 마찰계수가 0.4 까지 증가할 때까지, 분리력은 꾸준한 증가세를 나타내었으며 마찰계수 0.4 가 무마찰에 비하면 57%, 마찰계수 0.1 에 비하면 51%, 0.2 에 비하면 32%, 0.3 에 비하면 14% 큰 분리력을 예측하였으며, 이로부터 마찰계수의 증가가 분리력에 민감하게 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 마찰계수가 0.5 에 이를 때까지 분리력은 증가하였으나, 파단의 형태가 두 재료의 분리에서 목 부위의 파단으로 변화하였다. 이 해석에서는 파단 이론을 접목시키지 않았기 때문에, 마찰계수가 0.5 에 이르기까지 지속적 증가가 예측된 분리력은 실제와 다를 수 있다. 따라서 0.4 의 마찰계수가 분리력의 극대화 측면에서 최적치라고 판단된다. 이것은 다수의 기존 연구자들이 충분한 근거가 없는 상태에서 사용한 재료 간의 마찰계수 값과 일치한다.

REFERENCES

- [1] M. M. Eshtayeh, M. Hrairi, 2015, Recent and future development of the application of finite element analysis in clinching process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 84, No.9-12, pp. 2589-2608, <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7781-z>.
- [2] K. Mori, Y. Abe, T. Kato, 2012, Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminium alloy sheets joined by mechanical clinching and self-pierce riveting, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 212, No.9, pp. 1900-1905, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.04.017>.
- [3] S. Coppieters, S. Cooreman, P. Lava, H. Sol, P. V. Houtte and D. Debruyne, 2010, Reproducing the experimental pull-out and shear strength of clinched sheet metal connections using FEA, *Int. J. Mater. Form.*, Vol. 4, No.4, pp. 429-440, <https://doi.org/10.1007/s12289-010-1023-6>.

- [4] J. P. Varis, J. Lepisto, 2003, A simple testing-based procedure and simulation of the clinching process using finite element analysis for establishing clinching parameters, *Thin-Walled Struct.*, Vol.41, No.8, pp. 691-709, [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(03\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(03)00026-0).
- [5] J. Mucha, 2011, The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint, *Mater. Des.*, Vol. 32, No. 10, pp. 4943-4954, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.045>.
- [6] M. Oudjene, L. Ben-Ayed, 2007, On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method, *Eng. Struct.*, Vol. 30, No. 6, pp. 1782-1788, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.10.017>.
- [7] J. Y. Kim, C. J. Lee, S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, 2009, Effect of shape parameters of tool on improvement of joining strength in clinching, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, No. 5, pp. 392-400, <https://doi.org/10.5228/KSPP.2009.18.5.392>.
- [8] C. J. Lee, J. Y. Kim, S. K. Lee, D. C. Ko and B. M. Kim, 2009, Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets, *Mater. Design*, Vol. 31, No. 4, pp. 1854-1861, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.064>.
- [9] R. Sekar, M. S. Joun, 2018, Optimal design of clinching process for maximizing joint strength, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*
- [10] D. S. Kang, E. T. Park, A. Tullu, B. S. Kang, W. J. Song, 2016, Prediction and verification of lateral joining strength for tapered-hole clinching using the taguchi method, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 25, No. 1, pp. 36-42, <https://doi.org/10.5228/KSTP.25.1.36>.
- [11] J. Y. Kim, C. J. Lee, S. K. Lee, D. C. Ko and B. M. Kim, 2008, The effect of adhesive layer on joining strength of the hybrid clinching joint, *Proc. Kor. Soc. Mech. Eng. Conf.*
- [12] F. Lambiase, A. Di. Ilio, 2016, Damage analysis in mechanical clinching: experimental and numerical study, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 230, pp. 109-120, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.11.013>.
- [13] A. A. de Paula, M. T. P. Aguilar, A. E. M. Pertence, P. R. Cetlin, 2007, Finite element simulations of the clinch joining of metallic sheets, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 182, No.1-3, pp. 352-357, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.08.014>.
- [14] D. H. Jang, B. B. Hwang, 2003, Rigid plastic FE modeling of frictional contact problems based on a penalty method, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 12, No. 1, pp. 34-42, <https://doi.org/10.5228/KSPP.2003.12.1.034>.
- [15] Tox Pressotechnik GmbH & Co. KG, 2019, TOX-clinching technology clinching tools and accessories, <https://www.tox-pressotechnik.com>
- [16] V. R. Jayasekara, J. H. Noh, B. B. Hwang, K. C. Ham, D. H. Jang, 2007, A study on the forming characteristics of clinching joint process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 16, No. 8, pp. 603-613, <https://doi.org/10.5228/KSPP.2007.16.8.603>.
- [17] M. S. Joun, M. C. Lee, 1998, Quadrilateral finite element generation and mesh quality control for metal forming simulation, *Int. J. Num. Methods Eng.*, Vol. 40, No. 21, pp. 4059-4075, [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0207\(19971115\)40:21<4059::aid-nme249>3.0.co;2-e](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0207(19971115)40:21<4059::aid-nme249>3.0.co;2-e).