



레이저 용접을 위한 박판재의 정밀 전단 메카니즘 개발

(유한요소법을 이용한 정밀 전단 공정해석)

Development of Precise Shearing Mechanism on Thin Sheet for Laser Welding

(Analysis of Precise Shearing Process using FEM)

표 창 른* · 전 병 희* · 조 명 래*

C.R. Pyo · B.H. Jeon · M.R. Cho

(1999년 9월 6일 접수, 1999년 12월 6일 채택)

ABSTRACT

Recently, Tailor Welded Blank (TWB) is widely used in automotive industry since the transformation characteristic of its material can be changed. However, clearance between welding surfaces becomes the important factor which affect the quality of the laser weld, causing difficulties in preparing the sheet. The objective of this paper is to systematically evaluate the effects of previously presented fracture criterion and shearing condition on precise mechanical shearing simulation result. For this purpose, a parametric study was performed to investigate the effect of finite element size and fracture criterion on simulation result. Also, in order to predict the optimum shearing condition, effect of shearing conditions such as clearance and punch radius on the shear plane shape was evaluated.

1. 서 론

Tailor Welded Blank(TWB)는 복수의 강판을 그 목적에 맞추어 절단, 용접한 후에 성형가공하여 기계부품으로 사용하는 프레스 소재로

1980년대 후반부터 사용되기 시작한 용어이다. 이러한 판재는 소재에 대한 그 변형특성을 바꿀 수 있기 때문에 최근 자동차 차체 제작에 사용되기 시작하여 TWB의 이용기술이나 용접기술 그리고 프레스 성형기술에 관한 연구가 활발하게

* 인덕대학

수행되고 있다. 자동차 차체 제작을 위해 TWB를 이용하는 장점으로는 판두께 및 재질의 최적 배치, 연속적인 용접선으로 인한 결합강도 증가, 스팟(spot) 용접용의 겹침부 제거로 인한 경량화, 구성 패널수의 감소, 소재형상의 자유도가 크다는 점 등을 들 수 있다.

그러나 맞대기한 판재 사이의 틈새가 레이저 용접 품질에 영향을 주는 결정적인 인자 중에 하나가 되어 판재 준비에 어려움이 있다^{1,2)}. 일반적으로 자동차 업계에서는 코일재로 된 소재 강판을 직선 재단하여 절단하고 있지만, 절단 길이가 약 2,500mm까지 요구되고 있는 것이 최근의 실정이며, 이러한 조건을 충족시킨 상태에서 레이저 맞대기 용접을 실시하려면 정확한 전단면 처리과정이 필수적이다. 전단한 판재사이의 틈새가 크면 비드 함몰 등 용접불량으로 판재 성형시 용접 비드에 균열이 발생하거나 제품의 피로수명을 단축시키게 된다³⁾. Table 1은 레이저 용접시 용접 불량률의 원인을 나타낸 것으로 전단면의 불량에 의한 것이 80%를 차지하고 있다. 따라서 일정한 전단면을 얻기 위해서 레이저 절단이나 정밀 전단기를 이용한 정밀 전단, 또는 일반 전단기로 전단 후 밀링가공 등 별도의 공정으로 판재를 준비한다. 지금까지는 정밀 전단면을 얻기 위해 레이저 절단에 의존하는 것이 현실이지만, 경제성이나 대량생산성, 그리고 신뢰성 등의 면에서 레이저 절단이나 밀링가공보다는 정밀 전단기가 선호되고 있다.

유병길 등⁴⁾은 정밀 전단면의 품질을 평가하기 위해 진직도(straightness) 개념을 이용한 실험적 연구를 수행한 바 있으며, Taupin 등⁵⁾은 파단 기준(fracture criterion)으로 "damage value"를 도입하여 정밀 전단 공정에 대한 수치해석적 연구를 수행한 바 있다. Cockroft 등⁶⁾은 정밀 전단 공정의 시뮬레이션을 위한 파단 기준으로 "effective strain"을 제안한 바 있으며, 최근 정밀 전단 공정의 수치해석적 연구를 위해 파단 기준 설정 등에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다⁷⁻¹¹⁾. 그러나 아직까지 정밀 전단 공정의 시뮬레이션을 위한 파단 기준이나 공정상의 요소가 전단면에 미치는 영향 평가 등에 관한 연구가 체계적으로 수행된 바는 없다.

본 논문의 목적은 정밀 전단 공정의 시뮬레이션을 위한 파단 기준 설정의 기초 연구로 기존에 제시된 파단 기준 및 전단기의 형상 등이 정밀 전단 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 체계적으로 평가하는 것이다.

Table 1 A kind of welding inferiority

불량종류	불량률 (%)	비고
전단면 불량	80	전단면이 두께의 70% 이상
Gap 불량	10	판재사이의 최대허용거리 0.2mm
수평불량	3	용접 jig에 의존
기 타	7	용접 불량

2. 해석대상

Fig. 1은 해석에 사용된 정밀 전단을 위한 전단기의 형상을 나타낸 것이다. 전단기는 편치와 다이로 구성되어 있으며 정밀 전단을 위한 판재의 두께 t 는 1mm이다. 해석을 위한 판재의 재료물성치를 Table 2에 정리하였으며, Fig. 2는 판재의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다.

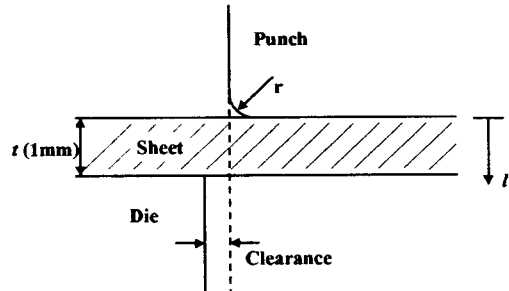


Fig. 1 Schematic illustration of analysis model

Table 2 Material properties of the sheet

Material model	Material coefficients	
	Young's modulus, E (GPa)	210
Poisson's ratio, ν	0.29	
Mass density, ρ (ton/mm ³)	7.85×10^{-9}	
Yield strength, σ_y (MPa)	215	

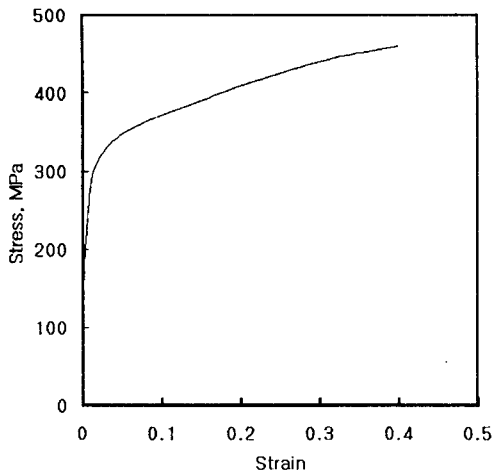


Fig. 2 Stress-strain curve of the sheet

3. 유한요소법을 이용한 정밀 전단 시뮬레이션

3.1 해석모델

Fig. 3은 정밀 전단 시뮬레이션을 위해 본 연구에서 구성한 판재의 유한요소모델을 나타낸 것이다. 유한요소모델의 구성을 위해 전단기의 펀치와 다이에는 4절점의 쉘 요소가 사용되었으며, 판재에는 8절점의 솔리드 요소가 사용되었다. 유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA Ver. 940을 사용하여 수행하였으며, 해석에 사용된 전체 요소의 수는 2,409개이며, 절점의 수는 4,994개이다. 또한 정밀 전단 시뮬레이션을 위한 파단 기준으로는 소성 변형률 조건을 사용하였다.

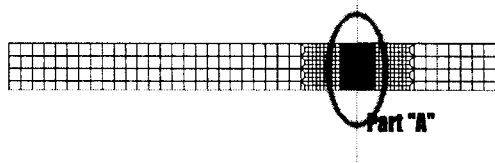
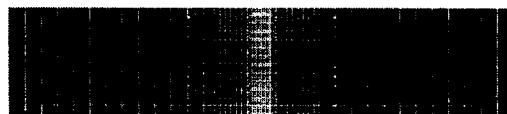


Fig. 3 Two dimensional mesh design for finite element analysis

3.2 정밀 전단 시뮬레이션을 위한 요소 크기 결정

정밀 전단 시뮬레이션에 사용된 유한요소망의 크기는 전단면의 발생 및 형성에 많은 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 정밀 전단 시뮬레이션을 위한 최적의 유한요소망 구성을 위해 유한요소의 크기가 전단면의 형성에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 전단면인 Fig. 3의 "A" 부분의 요소 크기를 3가지로 변화시켜 해석을 수행하였다. Fig. 4는 3가지 경우에 대한 유한요소망을 나타낸 것으로 (a)는 전단면의 요소망 크기가 $100\mu\text{m}$, (b)는 $50\mu\text{m}$, (c)는 $10\mu\text{m}$ 인 경우이다. 이때 파단 기준인 소성 변형률은 2.0으로 가정하였으며, 펀치의 반경은 0.01mm, 펀치와 다이의 틈새(clearance)는 0.03mm로 고정하였다.

(a) $100\mu\text{m}$ 인 경우(b) $50\mu\text{m}$ 인 경우(c) $10\mu\text{m}$ 인 경우Fig. 4 Schematics of finite element models for each shear plane element size with (a) $100\mu\text{m}$, (b) $50\mu\text{m}$, (c) $10\mu\text{m}$

3.3 파단 기준의 영향 평가

정밀 전단 시뮬레이션을 위해서는 정확한 파단 기준의 설정이 필수적이다. 본 연구에서는 파단 기준 설정을 위한 기초 연구로 파단 기준으로 사용된 소성 변형률이 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 소성 변형률을 각각 1.5, 2.0, 2.5로 변화시켜 해석을 수

행하였으며, 이때 펀치와 다이의 틈새 및 펀치의 반경은 0.01mm로 고정하였다.

3.4 전단기 형상의 영향 평가

본 연구에서는 정밀 전단 공정에 사용되는 전단기의 형상이 해석 결과에 미치는 영향을 평가하기 위해서 펀치와 다이의 틈새, 그리고 펀치 반경을 변화시켜 해석을 수행하였다. Table 3은 해석 조건을 나타낸 것이다. 틈새의 변화가 해석 결과에 미치는 영향을 평가하기 위해서 펀치 반경이 0.01mm인 경우에 대해 틈새(0.01mm, 0.03mm, 0.05mm)와 소성 변형률(1.5, 2.0, 2.5)을 변화시켜 총 9가지의 경우에 대한 해석을 수행하였다. 또한 펀치 반경의 변화가 해석 결과에 미치는 영향을 평가하기 위해서 틈새가 0.03mm인 경우에 대해 펀치 반경(0.01mm, 0.05mm)과 소성 변형률(1.5, 2.0, 2.5)을 변화시켜 총 6가지 경우에 대해 해석을 수행하였다.

Table 3 Analysis matrix

Punch radius (mm)	Clearance (mm)	Plastic strain
0.01	0.01	1.5, 2.0, 2.5
	0.03	
	0.05	
0.05	0.03	1.5, 2.0, 2.5

4. 해석 결과

4.1 정밀 전단 시뮬레이션을 위한 요소 크기 결정

Fig. 5는 전단면의 요소망의 크기를 3가지로 변화시켜 해석을 수행하여 예측한 전단면의 형상을 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 (a)의 경우는 전단면의 요소망의 크기가 100 μ m인 경우의 해석 결과이며, (b)와 (c)는 각각 50 μ m와 10 μ m인 경우의 해석결과이다. 해석을 수행한 결과, (a)와 (b)의 경우는 그림에 나타난 바와 같이 변형률의 분포 및 전단면의 형상이 실제 경우와 매우 다름을 알 수 있다. 그러나 (c)의 경우는 변형률 및 변형 형상이 시뮬레이션 과정을 적절히 모사하였다. 따라서 정밀 전단

시뮬레이션 결과는 요소 크기에 민감하였으며, 본 연구에서 사용된 해석 대상의 경우는 정확한 해석을 위해서 요소 크기가 10 μ m이하가 되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 전단면 요소의 크기를 10 μ m로 하였다.

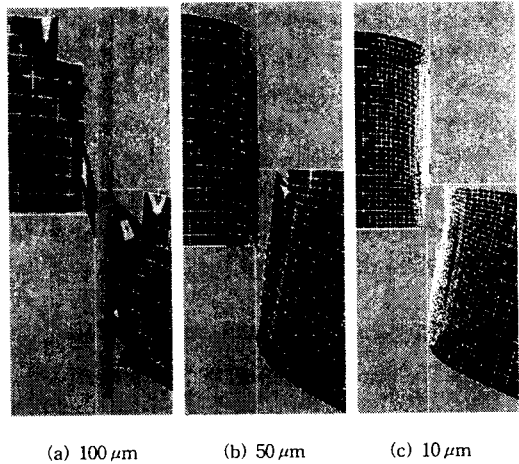


Fig. 5 Simulation results for each shear plane element size

4.2 파단 기준의 영향 평가

Fig. 6은 완전 전단이 발생하였을 때의 펀치

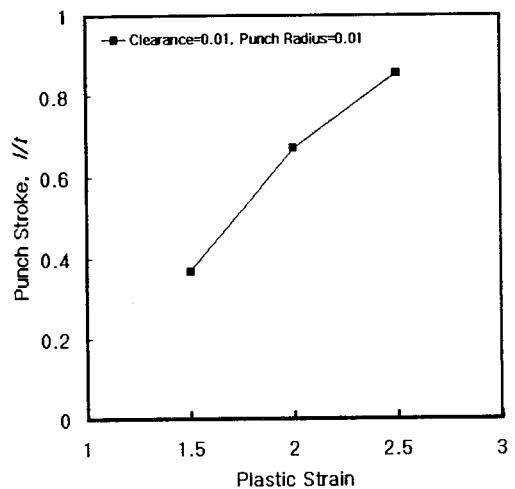


Fig. 6 Comparison of analysis results for various plastic strain values

이동거리(punch stroke, l/t)를 각각의 소성 변형률에 대해 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 소성 변형률이 1.5인 경우에는 펀치 이동거리가 약 0.4인 경우에 완전 전단이 발생하였으며, 2.0과 2.5인 경우에는 각각 0.7, 0.9인 경우에 완전 전단이 발생하였다. 따라서 이 결과를 실험결과와 비교하면 정밀 전단 시뮬레이션을 위한 파단 기준을 효과적으로 설정할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 소성 변형률과 펀치 이동거리는 선형적으로 변화하였다.

4.3 전단기 형상의 영향 평가

Fig. 7은 틈새의 변화에 따른 펀치 이동거리를 각각의 소성 변형률에 대해 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 틈새가 증가함에 따라 완전 전단이 발생하는 펀치 이동거리가 증가하였다. 또한 앞서 언급한 바와 같이 모든 경우에 대해 소성 변형률과 완전 전단이 발생하는 펀치 이동거리는 선형적으로 변화하였다. Fig. 8은 예측된 전단면의 형상을 틈새의 변화에 따라 나타낸 것으로 틈새가 증가함에 따라 전단면의 품질이 점차 저하되었다.

Fig. 9는 펀치 반경의 변화에 따른 펀치 이동거리를 각각의 소성 변형률에 대해 나타낸 것이

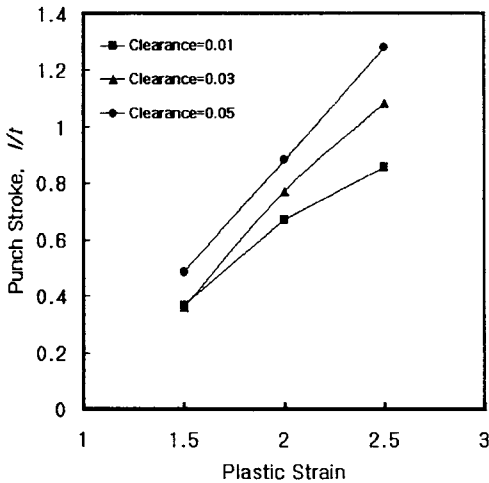
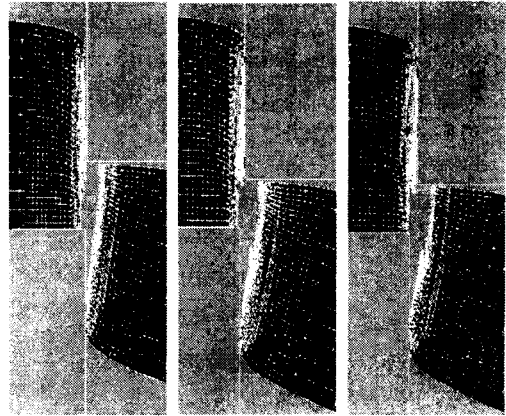


Fig. 7 Comparison of analysis results for various clearance values (punch radius=0.01mm)



(a) 0.01mm (b) 0.03mm (c) 0.05mm

Fig. 8 Simulation results for various clearance values (punch radius=0.01mm, plastic strain=2.0)

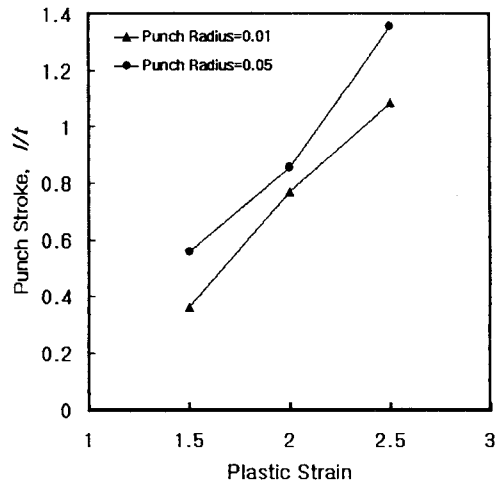


Fig. 9 Comparison of analysis results for various punch radius (clearance=0.03mm)

다. 그림에 나타난 바와 같이 펀치 반경이 증가함에 따라 완전 전단이 발생하는 펀치 이동거리가 증가하였다. 또한 틈새의 영향과 동일하게 소성 변형률과 완전 전단이 발생하는 펀치 이동거리는 선형적으로 변화하였다. Fig. 10은 예측된 전단면의 형상을 펀치 반경의 변화에 따라 나타낸 것으로 틈새의 경우와 동일하게 펀치 반경이 증가함에 따라 전단면의 품질이 점차 저하

되었다. 따라서 본 연구에서 사용한 해석 방법을 이용하면 최적의 전단면을 얻기 위한 틈새, 펀치 반경 등의 전단기의 형상을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

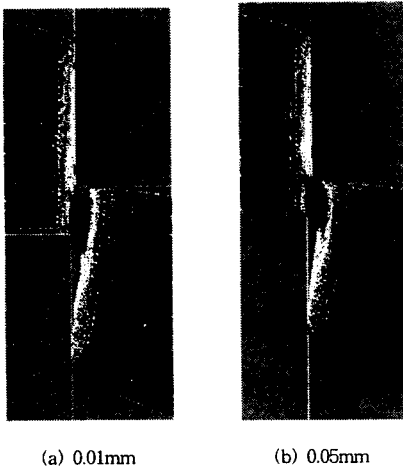


Fig. 10 Simulation results for various punch radius (clearance=0.03mm, plastic strain=2.0)

5. 결 론

본 연구에서는 정밀 전단 공정의 시뮬레이션을 위한 파단 기준 설정의 기초 연구로 파단 기준 및 전단기의 형상 등이 정밀 전단 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 체계적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정밀 전단 공정의 시뮬레이션 결과는 사용된 유한요소 크기에 민감하며, 본 연구에서 사용된 해석 대상의 경우 정확한 해석을 위해서는 요소 크기가 10 μ m이하가 되어야 한다.
- 2) 파단 기준으로 소성 변형률을 사용한 결과, 소성 변형률과 완전 전단이 발생하는 펀치 이동거리는 선형적으로 변화하였으며, 이 결과를 실험결과와 비교하면 전단 예측을 위한 파단 기준을 효과적으로 설정할 수 있다.
- 3) 최적의 전단면이 생성되는 전단기의 형상을 예측하기 위해 틈새 및 펀치 반경을 변화시켜 해석을 수행한 결과, 틈새 및 펀치 반경이 증가함에 따라 완전 전단이 발생하는 펀치 이동거리는 증가하였다. 또한 그에 따라 전단

면의 품질은 저하되었다.

- 4) 본 연구에서 사용된 해석 방법을 이용하면 최적의 전단면을 얻기 위한 틈새, 펀치 반경 등의 전단기의 형상을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

이 논문은 1998년 학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원된 것으로, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) A.J. Selige, W. Prange, "Production and Usage of Laser Beam-Welded Sheet Metal", SAE 870413, pp. 2164~2172, 1987.
- 2) S. Melbourne, "An Overview of Tailored Blanks and Preliminary Design Guidelines", Automotive Laser Application Workshop, Dearborn, Michigan, pp. 1~33, 1994.
- 3) M.G. Forrest, W.A. Marttila, "A Study of Effects of Laser Welding Process Parameters Variation on Weld Quality for Zn-coated Thin Auto Body Sheet Material", Laser Material Processing Workshop, pp. 1~28, 1996.
- 4) 유병길, 이경돈, "테일러드블랭크 용접을 위한 전단 공정 연구", 대한용접학회지, 제17, 제2호, pp. 128~137, 1999.
- 5) E. Taupin, et al., "Material Fracture and Burr Formation in Blanking Results of FEM Simulation and Comparison with Experiments", Journal of Materials Processing Technology 59, pp. 68~78, 1996.
- 6) M.G. Cockroft, D.J. Latham, "A Simple Criterion of Fracture for Ductile Fracture of Metals", National Engineering Laboratory, Report No. 240, 1966.
- 7) S.H. Jeong, et al., "A Study on Shearing Mechanism by FEM Simulation", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, pp. 631~634, 1996.
- 8) D. Brokken, et al., "Numerical Analysis of

- the Metal Blanking Process”, *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. II, pp. 665~668, 1996.
- 9) R. Hambli, et al., “Fracture Prediction of Sheet-Metal Blanking Process”, *Advanced Methods in Material Processing Defects*, pp. 125~134, 1997.
- 10) Q. Zhou, et al., “A Tension Zone Model of Blanking and Tearing of Ductile Metal Plates”, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 38, No. 3, pp. 303~324, 1996.
- 11) Z.H. Chen, et al., “Large Deformation Finite Element Analysis of Strain Localization in Fine-Blanking Process”, *Metals and Materials*, Vol. 4, No. 3 pp. 529~532, 1998.
-