한국소성가공학회 2005년도 춘계학술대회 논문집 pp. 249~254

무금형 점진 판재 성형에서 공구경로 최적화를 위한 성형한계에 관한 연구

이승진[1]· 김민철[1]· 이영선[1]· 권용남[1]· 이정환[1]

Studies on the forming limits for optimization of the tool path in Dieless incremental sheet metal forming

S. J. Lee, M. C. Kim, Y. S. Lee, Y. N. Kwon and J. H. Lee

Abstract

Recently, as the industrial demand for small quantity batch production of sheet metal components, the application of dieless forming technology to production of these component rise with the advantages of the reduction in manufacturing cost and time. In dieless forming processes, the determination of moving path of tool plays an important role in producing successfully formed parts. In order to obtain the optimized moving path of tool avoiding forming failure, it is necessary to examine the forming limit of sheet material. Therefore, in this study, as the new criterion to evaluate the formability of sheet material in dieless forming processes FDD(feeding depth diagram) with respect to feeding depth and punch diameter is proposed. Thus, the FDD for the sheet materials of STS304 and Ti-grade2 were obtained from a series of FDT(feeding depth test). In addition the possibility of the application of FLD in judging forming severity in dieless forming processes was investigated by comparing the results of FE analyses based on FLD and experimental FDT.

Key Words : Dieless incremental sheet metal forming, Forming limits, Feeding Depth Test

1. 서 론

단순한 2 차원 곡면을 제외한 대부분의 금속판재성형은 한 쌍의 다이를 사용하여 이루어지는데 이러한 전통적인 방법은 생산성과 정밀도가 높다는 장점 때문에 널리 사용되어 왔으나 금형 돌출부와 접촉하는 소재에 응력이 집중되어 변형이 불균일하게 진행되기 때문에 성형한계가 낮아 제품 디자인에 많은 제약이 따를 뿐만 아니라, 금형 제작비가 고가인 단점으로 인하여 대량생산이 아니거나 금형이 대형인 경우에는 생산단가가 크게 올라가며, 신제품의 개발기간이 길어지는 문제를 가지고 있다.[1] 따라서 금형을 전혀 사용하지 않고도 다양한 형상의 제품을 제조할 수 있는 무금형 박판성형 기술 개발은 여러 업계의 오랜 꿈이었다. 이에 미국과 일본에서는 다수의 금속봉을 이용하여 금형 없이 금속판재의 3 차원 곡면을 성형하는 Multi-Point Forming (MPF)방식이 연구되고 상용화되고 있으나, 이러한 MPF 방식은 수많은 선재나 봉재를 사용해야 하므로 높은 정밀도를 요하는 분야에서는 이를 일일이 재배열하는데 상당 시간이 걸리며, 곡면 돌출부에서 국부적으로 큰 힘과 변형이 집중되기 때문에 접촉부에 자국이 생기거나 그 주위에 주름이 발생하기 쉬운 반

1. 한국기계연구원 소재성형연구센타

면[1,4], 설계 형상의 CAD 정보로부터 점진 성형에 필요한 공구 궤적에 관한 정보를 추출하여 CNC 제어를 이용하여 판재를 점진적으로 성형하는 무금형 점진 판재 성형법(Dieless incre-mental sheet metal forming)은 3 차원 CAD 정보만 있으면 금형 없이 원하는 형상을 제작해 낼 수 있기 때문에 다양한 분야의 수요를 만족시킬 수 있는 잠재력이 높다고 할 수 있다.

이러한 점진 성형 기술은 공구가 이동하여 제품을 점진적으로 성형하기 때문에 공구의 이동경로가 매우 중요하며 이는 형상과 대상 소재에 따라 변화 되어야 한다. 최적화된 공구 경로는 형상을 우선적으로 정의하고 대상 소재의 성형 한계에 준하여 1 회의 성형량을 결정하기 때문에 소재와 제품 형상, 그리고 공구 경로 형상에 따른 성형 한계를 규명해야 한다. 본 연구에서는 다양한 응력조건하에서의 성형한계를 실험적인 방법과 해석적인 방법을 병행하여 분석하고 이를 이용하여 시제품 성형시의 중요 사항에 대하여 연구하였다.

2. 실험 및 고찰

판재의 성형성(formability)을 평가하기 위한 여러가지 방법중 원형격자해석법과 함께 도입된 성형한계도(forming limits diagram, FLD)의 개념은 판재의 성형성 및 성형난이도 평가와 성형불량 원인 분석에 대한 과학적 접근을 가능하게 하였고[2], 여러 활용 예를 통하여 그 유효성이 입증되었으나 박판의 점진적 성형공정은 재료에 국부적 변형을 반복적으로 가함으로써 원하는 형상을 성형하는 방법이므로 FLD 개념은 점진성형에 사용되는 재료의 성형성 평가를 위한 변별력이 떨어진다고 사료되어, 보다 실용적인 방법으로서 실제 성형에 사용되는 공구와 동일한 펀치를 이용한 성형한계실험(Feeding Depth Test, FDT)을 실시하고, 상용 해석 프로그램인 LS-DYNA 를 이용하여 유한요소 해석을 수행하여 각각의 데이터를 비교하였다.

2.1 실험재료

상용되고 있는 여러 가지 금속판재중 STS 304 와 Ti-grade2 의 두께 0.8mm 의 판재에서 시편을 채취하여 인장실험 및 FDT 실험을 수행하였다.

2.2 인장 시험

각 재료의 진응력-진변형률 곡선 및 항복응력, 인장강도 등 재료의 기계적 특성을 구하기 위하여 재료를 압연방향에 대하여 0° , 45° ,90° 각도로 ASTM E-8M Subsize 규격으로 채취한 인장시편을 이용하여 실험한 후, 얻어진 진응력-진변형률 그래프를 Fig.1, Fig.2 에 나타내었다.

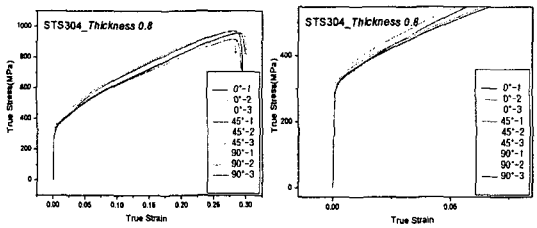


Fig. 1 Strain-Stress Curve of STS304_0.8t

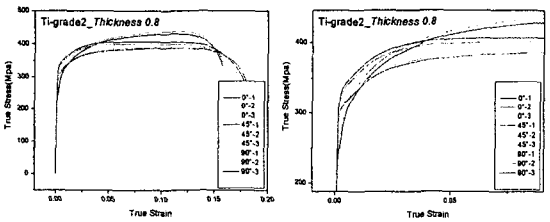


Fig. 2 Strain-Stress Curve of Ti-grade2_0.8t

인장실험에서의 결과를 이용하여 각각의 소재에 대한 항복응력(Y.S), 인장강도(T.S), 연신율(EL), 가공경화상수(K), 가공경화지수(n)의 평균값을 Table 1 에 나타내었으며, 항복강도의 크기는 STS304 에 대해서는 0°, 90°, 45°방향 순으로 나타났으며, Ti-grade2 에 대해서는 90°, 45°, 0°방향 순으로 나타났다.

Table 1 Properties of sheets measured by tensile test

	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	EL (%)	K	n
STS304	323	714	34	1620	0.46
Ti-grade2	308	377	18	490`	0.07

2.3 Feeding Depth Test

무금형 점진 성형의 실제적인 성형한계를 규명하기 위하여 용량 200ton 의 유압식 프레스에서 FLD Test 와 유사한 방법으로 충분한 클램핑 하중을 가하고, 성형에 사용되는 공구와 동일한 크기의 지름 Φ3, Φ5, Φ10, Φ15, Φ20 인 Punch 를 이용하여(Fig.3) 12mm/min 의 속도로 국부 넥킹이 일어날 때까지 성형하였으며, 판재의 최소 성형한계를 유도하기 위하여 윤활을 하지 않은 건마찰(dry friction)조건에서 실험하였다. Fig.4 에서는 각각 다른 크기의 펀치를 이용한 Feeding Depth Test 결과를 보여주고 있으며, 결과값을 Table 2 에 정리하였다.

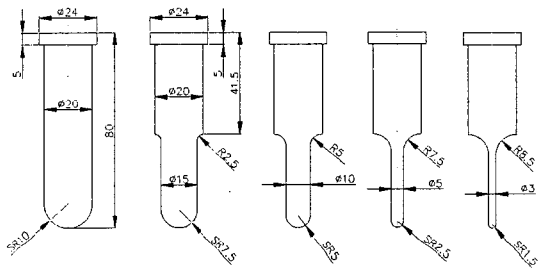


Fig. 3 Punch for Feeding Depth Test

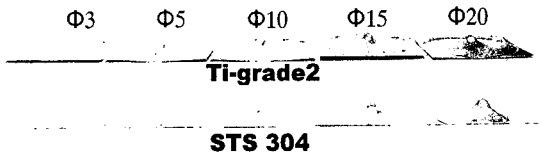


Fig. 4 Result of Feeding Depth Test

Table 2 Feeding Depth Test

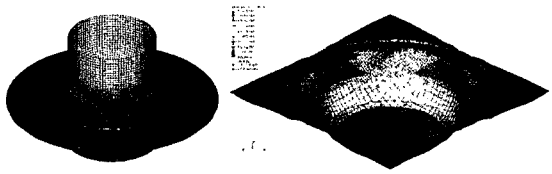
Unit: mm

	Φ3	Φ5	Φ10	Φ15	Φ20
STS304	6.39	11.48	17.51	21.1	24.9
Ti-grade2	3.31	5.1	9.2	12.89	15.16

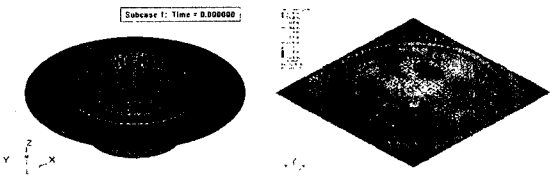
실험결과에서 알 수 있듯이 공구의 크기가 클수록 성형한계가 커지고 표면조도 또한 개선될 수는 있으나 공구의 반경이 크기 때문에 복잡한 형상을 가공하는데 어려움이 있다. 그러므로 복잡한 형상을 가공하기 위해서는 지름이 작은 공구를 사용해야 할 것이다.

3. 유한요소 해석

판재의 성형성을 평가하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA 를 이용하여 Keeler Eq.을 적용한 FLD 해석 및 FDT 실험 공정과 동일한 조건으로 각각의 펀치에 대하여 성형한계 해석을 수행하였으며 Fig.5(a), (b)에서 각각의 해석결과에 대한 응력분포를 나타내고 있다. Fig.6 은 각 해석결과에 대한 FLD 곡선으로써 Fig.6(a)는 일반적인 성형공정의 FLD 곡선이며 Fig.6(b)는 무금형 점진 판재성형에 이용되는 공구를 이용한 FLD 곡선으로써, FDT 해석 결과 나타난 변형률은 일반적인 FLD 곡선을 넘어서는 것을 볼 수 있는데, 이를 통해 무금형 점진성형에서의 성형성 평가는 일반적인 FLD 실험이 아닌 FDT 실험을 통해 평가하는 것이 보다 정확한 성형한계를 규명하는데 유리하다는 것을 알 수 있다.

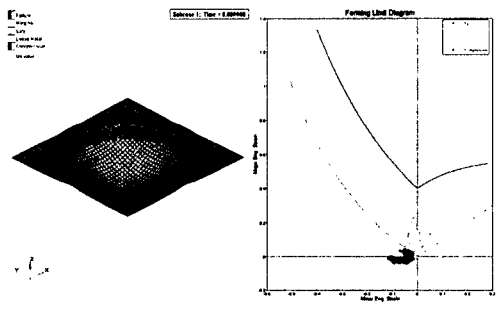


(a). FLD by LS-DYNA (STS 304)

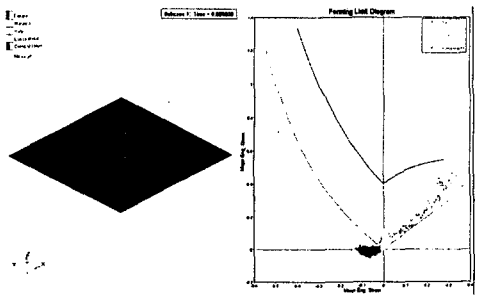


(b). FDT by LS-DYNA (STS 304, Φ10)

Fig. 5 Comparison of Von-Mises stress value for FLD and FDT



(a). General FLD curve (STS304)



(a). FLD curve by FDT (STS 304)

Fig. 6 Comparison between FLD curve and FDT curve

4. 실험 결과 비교 및 토의

성형성이 다른 STS304, Ti-grade2 판재에 대하여 단축인장, FDT 실험을 실시하고, 유한요소 해석 수행하여 각 판재에 대한 Feeding Depth 에 대한 비교값을 Fig.7 에 나타내었으며, Fig.8 은 펀치 크기에 따른 변형 및 응력변화를 나타내고 있다.

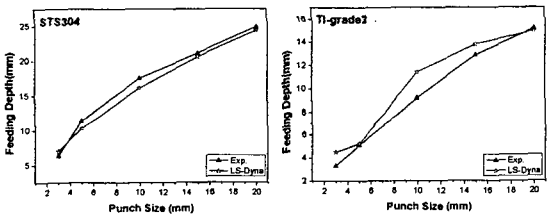


Fig.7 Feeding Depth comparison between FEM and experimental data

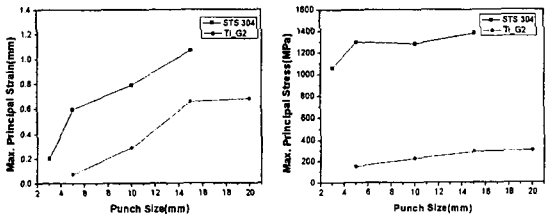


Fig.8 FEM result about Punch size (Strain, Stress)

본 연구에서는 무금형 점진 판재성형법에 대한 기초 연구로써 실제 성형공정에 이용되는 구형공구와 동일한 형상의 펀치를 이용하여 성형한계 실험을 실시 하였으며, 유한요소법을 적용하여 실험 결과와 비교, 분석하여 무금형 점진 판재 성형법에서의 공구경로 생성시 각 판재 성형한계에 기초한 최적의 공구경로 생성 기준을 얻고자 하였으며, 차후 더욱 정확한 기준을 마련하기 위하여 FLD 실험을 실시하여 FDT 와의 연관성에 대하여 연구할 것이며, Z 축방향의 성형성 뿐만 아니라 공구진행 경로에 대한 최적의 Feeding Depth, Tool Speed 에 관한 연구를 계속 진행하여 무금형 점진 판재성형에서의 최적화된 공구경로를 생성하기 위한 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 21C 프론티어 연구개발 사업인 "차세대 소재성형 기술 개발사업"으로 진행된 결과로써 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] 박종우, 2002, 금속 판재 성형 기술의 진보, 한국소성가공학회지, 제 11 권, 제 3 호, pp. 223~230.

[2] 곽인구, 신용성, 김형종, 김헌영, 2000, 금속판재의 성형성 평가를 위한 실험 및 유한요소해석에 관한 고찰, 한국소성가공학회지, 제 9 권, 제 4 호, pp. 379~388.

[3] 심명섭, 박종진, 소형 구를 이용한 박판 성형에서의 변형특성, 한국소성가공학회지, 제 10 권, 제 1 호, pp. 59~66.

[4] 박종우, 홍예선, 양승훈, 2002, 유체성형과 결합한 다점 무금형 판재 성형기술, 한국소성가공학회 2002 년도 춘계학술대회 논문집 pp.58~61

[5] Y.H. Kim, J.J. Park, 2002, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, Journal of Materials Processing Technology 130-131, 42-46

[6] Elisabetta Ceretti, Claudini Giardini, Aldo Attanasio, 2004, Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines, Journal of Materials Processing Technology 152, 176-184.

[7] Jong-Jin Park, Yung-Ho Kim, 2003, Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique, Journal of Materials Processing Technology 140, 447-453.

[8] G.. Ambrogio, I. Costantino, L. De Napoli, L. Filice, 2004, Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation, Journal of Materials Processing Technology