

# 무 펀치 피어싱 공정에서 교번식 고압 적용을 통한 구멍 내 직벽 구현 해석

이상욱<sup>1\*</sup>, 엄태준<sup>1</sup>, 주영철<sup>1</sup>, 김국원<sup>1</sup>, 권계시<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>순천향대학교 기계공학과

## Analysis for Realization of Vertical Wall in Holes by Applying Alternate High Pressure in the Punchless Piercing Process

Sang-Wook Lee<sup>1\*</sup>, Tai-Joon Um<sup>1</sup>, Youngcheol Joo<sup>1</sup>, Kug-Weon Kim<sup>1</sup>  
and Kye-Si Kwon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Soonchunhyang University

**요약** 본 논문에서는 고압의 유체를 펀치 대신 사용하는 무 펀치 피어싱공정을 통해 얇은 금속 판에 거의 직벽을 가진 구멍을 내기 위한 방법으로 위, 아래 양 방향으로 교번적으로 고압을 가하는 피어싱공정을 제안하고 이를 기존 단 방향 피어싱공정 결과와 비교하였다. 연성파괴이론 중 하나인 Lemaitre 손상이론을 도입하여 두 방법에 따른 절단면의 모양을 수치적으로 얻은 후 이들 간의 차이를 나타내었다. 해석 결과, 양 방향에서 교번적으로 가압한 경우 수직도가 수직선 기준 3.6°정도의 매우 작은 편차를 보여 단면 형상이 거의 수직으로 나타남을 알 수 있었다.

**Abstract** In this work, the punchless piercing process with application of alternate high pressure has been proposed as a method to obtain pierced holes having nearly vertical wall over thin metal plates. The numerical simulation considering Lemaitre damage model has been accomplished for the proposed method. The simulated results have been compared with those by conventional one-way punchless piercing process. It has been revealed that the fractured section made by pressure alternation method shows nearly steep wall where the deviation angle from the vertical line is as small as 3.6°.

**Key Words** : Punchless Piercing, Alternate High Pressure, Lemaitre Damage Model, VUMAT

### 1. 서론

최근 들어 잉크젯[1,2], 디스플레이 분야에서 매우 얇은 금속 박판에 구멍을 다수 천공해야 할 필요성이 있는 부품들이 많이 요구되고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 매우 가는 드릴을 사용하거나, 화학적 에칭에 의하는 방법 등이 사용되고 있다. 하지만 다수 또는 많은 수의 천공이 필요한 경우 가공 시간이 많이 요구되어서 이를 해결하기 위한 방법의 하나로 고압을 이용한 무 펀치 피어싱공정이 제안되었다[3]. 하지만 기존 무 펀치 피어

싱공정을 통해 얻을 수 있는 구멍은 수직 벽을 가지고 있지 않기 때문에 실제 적용에 걸림돌로 작용할 수 있다.

본 논문에서는 고압을 금속 박판의 양면에 교번적으로 작용시켜 거의 직벽을 가진 구멍을 가공하는 무 펀치 피어싱공정을 제안하고 유한요소법을 이용한 수치 해석을 통하여 적용 가능성을 확인하고자 한다.

피어싱공정을 해석하기 위해서는 금속의 연성 파괴 이론을 수치 해석에 도입하는 것이 필수적인데 본 논문에서는 Lemaitre 손상 이론[4]을 상용 해석 소프트웨어인 ABAQUS에 VUMAT으로 코드화하여 적용하였다.

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-02) 지원으로 수행되었음.

\*교신저자 : 이상욱(swlee@sch.ac.kr)

접수일 09년 02월 27일

수정일 (1차 09년 05월 14일, 2차 09년 05월 19일)

게재확정일 09년 05월 27일

## 2. 본론

### 2.1 Lemaitre 손상 이론을 고려한 수식화

Lemaitre 손상 이론을 구현하기 위한 지배방정식은 다음과 같다.

1) Lemaitre 손상인자  $D$  ( $0 \leq D \leq 1$ )를 도입한 von Mises 항복조건 식은

$$\phi(\mathbf{S}) = \bar{\sigma}^2 - (1-D)^2 \kappa^2 \leq 0 \quad (1)$$

이며, 여기서  $\mathbf{S}$  는 편차응력으로 다음의

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\sigma} - \sigma_H \mathbf{I} \quad (2)$$

로 정의된다. 또한  $\boldsymbol{\sigma}$  는 코시응력이고  $\sigma_H$  는 정수압응력을 나타내며 다음과 같다.

$$\sigma_H = \frac{1}{3} \text{trace}(\boldsymbol{\sigma}) \quad (3)$$

식 (1)에서  $\bar{\sigma}$  는 유효응력을 나타내며 다음과 같이 정의되고

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}} \quad (4)$$

$\kappa$  는 특정 순간에서의 유동응력 값을 나타내며 다음의 유동 곡선 식으로부터 계산된다.

$$\kappa = K(\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon}^{pl})^n \quad (5)$$

여기서  $K$  는 강성계수를,  $n$  은 가공경화지수를,  $\bar{\epsilon}_0$  는 초기변형율을,  $\bar{\epsilon}^{pl}$  은 유효소성변형율을 의미한다. 이에 따라 유동응력증분값  $\Delta\kappa$  는

$$\Delta\kappa = h \Delta\bar{\epsilon}^{pl} \quad (6)$$

로 계산된다. 여기서

$$\Delta\bar{\epsilon}^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3} \Delta\boldsymbol{\epsilon}^{pl} : \Delta\boldsymbol{\epsilon}^{pl}} \quad (7)$$

$$h = nK(\bar{\epsilon}_0 + \bar{\epsilon}^{pl})^{n-1} \quad (8)$$

이다.

2) Lemaitre 손상인자  $D$  를 고려한 일반화된 Hooke의 법칙은

$$\Delta\boldsymbol{\sigma} = (1-D) \left( \lambda \text{trace}(\Delta\boldsymbol{\epsilon}^{el}) \mathbf{I} + 2\mu \Delta\boldsymbol{\epsilon}^{el} \right) \quad (9)$$

이며, 여기서  $\Delta\boldsymbol{\epsilon}^{el}$  은 변형율증분의 탄성부분을 의미한다. 변형율증분은 식 (10)처럼 탄성부분과 소성부분의 합으로 이루어져있다.

$$\Delta\boldsymbol{\epsilon} = \Delta\boldsymbol{\epsilon}^{el} + \Delta\boldsymbol{\epsilon}^{pl} \quad (10)$$

식 (9)에서  $\lambda$  와  $\mu$  는 Lamé 상수를 의미한다.

3) 소성유동법칙은

$$\Delta\boldsymbol{\epsilon}^{pl} = \Delta\gamma \mathbf{q} \quad (11)$$

로 정의되며, 여기서  $\mathbf{q}$  는 항복곡면의 단위수직벡터로서 다음의 식으로

$$\mathbf{q} = \frac{\mathbf{S}}{|\mathbf{S}|} \quad (12)$$

계산된다. 또한  $\Delta\gamma$  는 소성변형 승수로서 소성변형이 발생했을 때 응력적분을 진행하는 동안 결정되는 파라미터이다.

4) Lemaitre 손상인자의 증분값  $\Delta D$  는

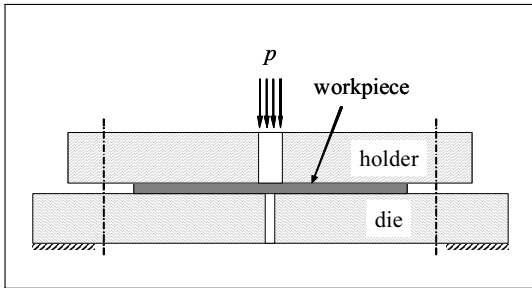
$$\Delta D = \frac{D_C}{\epsilon_R - \epsilon_D} \left[ \frac{2}{3} (1+\nu) + 3(1-2\nu) \left( \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} \right)^2 \right] \left( \frac{\kappa}{K} \right)^2 \Delta\bar{\epsilon}^{pl} \quad (13)$$

로 계산된다. 여기서,  $\epsilon_D$ ,  $\epsilon_R$ ,  $D_C$  는 재료마다 고유하게 결정되는 손상상수들로서 각각 손상시작변형율, 손상파단변형율, 손상파단임계값을 의미한다. 이 상수들은 Lemaitre가 제안한 반복적 하중-제하중 인장시험법[4]을 통하여 결정할 수 있다.

### 2.2 무 펀치 피어싱공정

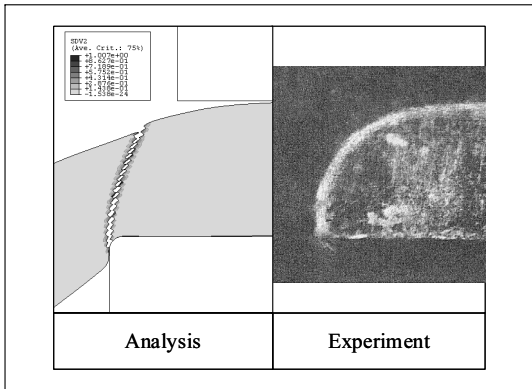
무 펀치 피어싱공정은 기존 피어싱공정에서 금속 재질의 펀치를 고압의 유체로 대체한 개념에서 출발한다. Murata등[3]이 이를 실험적으로 보여주었다.

공정의 개략도를 그림 1에 보였다. 그림에서처럼 고압의 유체를 한쪽 방향에서 재료가 파단에 이를 때까지 분사하여 최종적으로 구멍을 가공하는 공정이다. 이 공정은 대체로 매우 두께가 얇은 금속 박판에서 구멍을 가공하고자 할 때 큰 이점을 가진다. 왜냐하면 보통의 피어싱공정에서 펀치와 다이 사이의 틈새 크기는 재료 두께의 약 10%로 정하는 데, 재료가 매우 얇을 경우 틈새의 크기가 매우 작아 펀치와 다이를 제작하는 데 많은 비용이 소요될 수 있는데 무 펀치 피어싱공정에서는 이런 틈새를 고려할 필요가 없기 때문이다. 또 다른 이점으로는 좁은 영역에 다수의 구멍을 동시에 만들 수 있다는 점을 들 수 있다.



[그림 1] 무 펀치 피어싱공정의 개략도 [5]

Lee 등[5]은 Murata 등이 실험으로 보여준 공정을 Lemaitre 손상이론을 도입한 유한요소해석을 통해 성공적으로 해석을 수행한 바 있다. 해석 결과를 그림 2에 간략하게 나타내었다.



[그림 2] 무 펀치 피어싱공정에 의한 파단 해석 [5]과 실험 결과 [3]의 비교

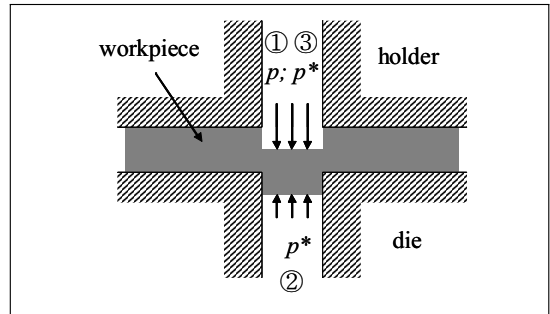
위 그림에서 볼 수 있듯이 무 펀치 피어싱공정에 의한 파단 단면 형상은 아치 형태를 띠고 있다. 이는 한쪽 방

향에서만 고압이 작용하는 관계로 재료가 아래쪽으로 변형되면서 자연히 위쪽 다이의 어깨 부분에 소성 변형의 대부분이 몰리기 때문이다.

본 논문에서 추구하고자 하는 바는 파단 단면 형상을 어떻게 하면 수직에 가깝게 만들 수 있는냐는 것이다. 이러한 필요성은 잉크젯 헤드의 노즐 가공이나 앞뒤면 구별 없는 초박판 천공 제품의 제작 등에서 제기된다.

### 2.3 교번식 무 펀치 피어싱공정

구멍의 파단 단면을 수직에 가깝게 만드는 방법의 하나로 위아래 양 방향에서 교번적으로 고압을 가해주는 양 방향 교번식 무 펀치 피어싱공정을 제안한다. 공정의 개략도는 그림 3과 같다.



[그림 3] 양 방향 교번식 무 펀치 피어싱공정 개략도

공정의 순서는 ① 위 방향에서 아래로  $p$ 의 고압을 파단이 발생하지 않는 범위 내에서 적절한 시간 동안 가해진 후 ② 아래 방향에서 위쪽으로  $p^*$ 의 고압으로 역시 파단이 발생하지 않는 범위 내에서 가압한 후 ③ 최종적으로 다시 위쪽에서 아래로  $p^*$ 로 가압하여 구멍을 완성하는 것이다. 만약  $p$ 와  $p^*$ 를 적절히 조절한다면 구멍 내 거의 수직에 가까운 직벽을 구현할 수 있을 것으로 예상된다.

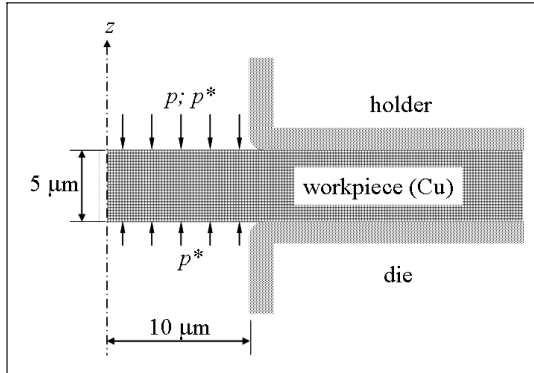
### 2.4 교번식 무 펀치 피어싱공정의 모델링

제안한 양 방향 교번식 무 펀치 피어싱공정에 대해 유한요소법을 이용한 수치 해석을 수행하였다. 파단을 예측하기 위한 모델로 2.1 절에 기술된 Lemaitre 손상이론을 채택하였으며 이를 VUMAT[6]으로 코드화하여 ABAQUS에 연계시켰다.

그림 4는 해석을 위한 유한요소 모델을 보여주고 있다. 직경 20 mm의 구멍을 가공하는 것으로 가정하였다. 축대칭임을 감안하여 절반에 대해 2차원 모델을 구성하였다. 재료는 변형 가능한 솔리드 요소 (CAX4R)로, 펀치

와 홀더는 변형이 되지 않는 강성 요소 (Rigid Tool)로 모델링 하였다. 사용된 요소수는 3,750개, 절점수는 3,926개이다.

재료는 99.9%의 구리 박판이며 그 물성치는 표 1과 같다.

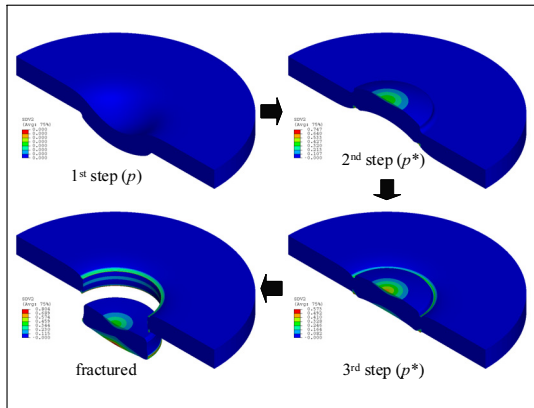


[그림 4] 유한요소 해석 모델

[표 1] 구리 박판의 물성치 [5]

$E$ (MPa)	$n$	$K$ (MPa)	$n$
98,990	0.35	497.48	0.28
$\bar{\epsilon}_0$	$\epsilon_D$	$\epsilon_R$	$D_C$
0.00316	0.35	1.07	0.85

가해진 압력의 크기는 몇 차례의 선형 해석을 통하여  $p$ 와  $p^*$ 를 각각 200 MPa과 240 MPa ( $p$ 의 1.2배)로 정하였다. 각 스텝마다 시간에 따른 압력의 변화는 싸인 곡선의 형태를 따르도록 하였다.



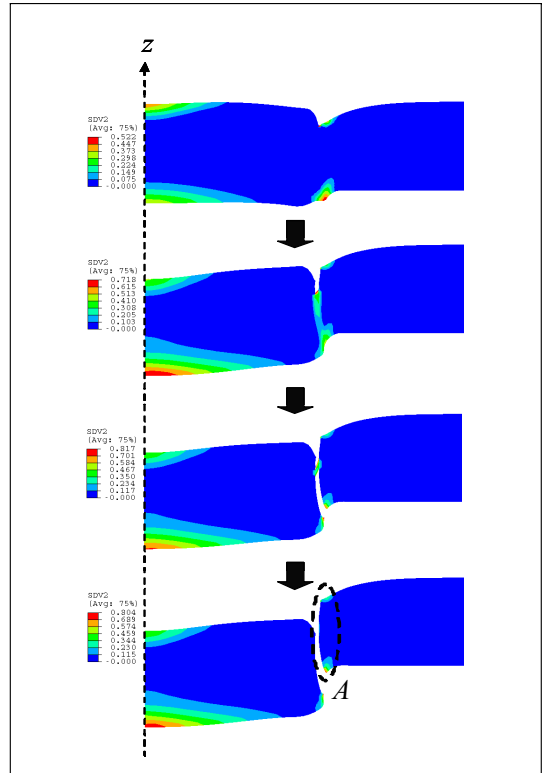
[그림 5] 각 단계별 변형 과정 및 파단 모습

## 2.5 교번식 무 펀치 피어싱공정의 해석 결과

그림 5는 각 단계별 성형 과정을 3차원 시각으로 보여 주고 있다.

어떤 요소의 Lemaitre 손상인자  $D$  가 1.0에 도달하면 파단이 된 것으로 판정하고 이후의 계산에서 제외하는 요소제거 기법을 사용하였다.

구멍의 단면에서 파단이 전파되어 가는 과정을 그림 6에 나타내었다. 이 과정은 3번째 단계에서 시작되므로 이전 단계의 결과는 생략되어 있다.

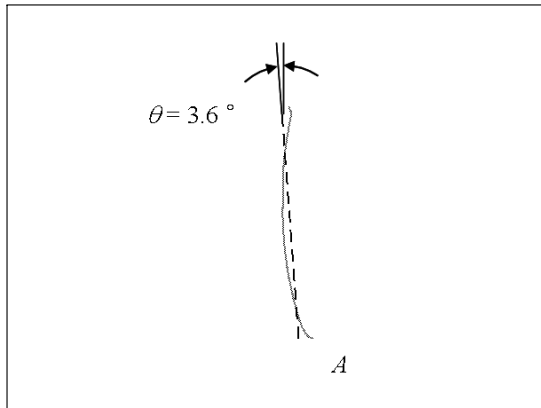


[그림 6] 파단의 전파 과정 및 파단 면의 형태

그림 6의 등고선은 Lemaitre 손상인자  $D$ 의 분포를 나타내고 있다. 파단의 시작은 홀더의 어깨부 쪽에서 일어나고 그 파단이 아래쪽으로 전파되는 도중 다이 어깨부 쪽에서도 파단이 시작되어 위쪽으로 전파되면서 중간에서 만나게 되고 이로서 재료가 최종적으로 절단된다. 절단된 단면은 거의 직벽에 가깝게 나타남을 볼 수 있다. 이 같은 결과는 위쪽으로 고압을 가해주는 2번째 단계가 포함되므로서 가능해 진 것으로 판단된다.

그림 6에서 A로 표시한 부분은 파단 후 남아있는 쪽의 단면을 지시한다. 이 단면의 수직도를 정량적으로 평가하

기 위하여 단면을 이루는 절점의 좌표값을 추출하여 이를 선형회귀법으로 분석하였다. 그림 7에 그 결과를 나타내었다. 그림에서 회색 실선은 단면의 형상을, 점선 직선은 최소자승법으로 추정된 선형회귀 직선을 나타낸다. 추정된 직선으로부터 파단 단면의 수직도를 계산한 결과 수직면으로부터 3.6°의 미미한 편차를 나타내었다. 이로써 교번식 고압 적용을 통하여 거의 직벽에 가까운 단면을 얻을 수 있음을 확인하였다.



[그림 7] A부 파단면의 수직도 평가 결과

### 3. 결론

무 펀치 피어싱 공정에서 교번식 고압을 적용하여 구멍 내 직벽을 구현하는 방안을 유한요소 해석을 통해 확인하고자 하였으며 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고압을 아래위에서 교번식으로 최소 세차례 이상 적용하면 펀치가 없어도 재료의 파단 유도만으로도 피어싱이 가능하다.
- (2) 위쪽에서 작용하는 고압은 아래쪽의 그것보다 1.2 배 정도 크게 가하는 것이 직벽 형성에 유리하다.
- (3) 파단 후 단면의 수직도를 선형회귀법으로 추정한 결과 수직면으로부터 약 3.6°의 미미한 편차를 나타내어 직벽에 매우 근접한 단면 형상을 얻을 수 있음을 확인하였다.
- (4) Lemaitre 손상 이론을 도입하여 개발된 VUMAT과 ABAQUS의 요소제거기법을 함께 사용하여 파단의 전과과정을 성공적으로 전산 모사하였다.

### 참고문헌

- [1] R. C. Durbeck, S. Sherr, "Output Hardcopy Devices", Academic Press Inc, 1988.
- [2] 高橋恭介, "最新 プリンター-應用技術", ツ-エムシ-出版, 2005.
- [3] M. Murata, Y. Uede, H. Suzuki, "Punchless punching of thin sheet metal by ultra high pressure gas for circular hole", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 48, pp. 59-68, 1995.
- [4] J. Lemaitre, "A continuous damage mechanics model for ductile fracture", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 107, pp. 83-89, 1985.
- [5] S. W. Lee, F. Pourboghrat, "Finite element simulation of the punchless piercing process with Lemaitre damage model", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 47, pp. 1756-1768, 2005.
- [6] "ABAQUS User's Manual Ver. 6.5", ABAQUS Inc, 2004.

#### 이 상 욱(Sang-Wook Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 서울대학교기계설계학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 한국과학기술원생산공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 한국과학기술원기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 :순천향대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

소성가공, 전산역학, 연료전지 등

#### 엄 태 준(Tai-Joon Um)

[정회원]



- 1977년 2월 : 서울대학교기계설계학과 (공학사)
- 1979년 2월 : 한국과학기술원기계공학과 (공학석사)
- 1989년 8월 : 오클라호마주립대 기계공학과 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 현재 :순천향대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

유압공학, 자동제어, 최적설계 등

**주 영 철**(Youngcheol Joo)

[정회원]



- 1984년 2월 : 한양대학교기계공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 한국과학기술원기계공학과 (공학석사)
- 1993년 5월 : UCLA기계공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 :순천향대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

열전달, MEMS, 내연기관 등

---

**김 국 원**(Kug-Weon Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교기계설계학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 서울대학교기계설계학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 서울대학교기계설계학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 :순천향대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

정밀가공, 전산역학, 제품설계 등

---

**권 계 시**(Kye-Si Kwon)

[정회원]



- 1992년 2월 : 연세대학교기계공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 한국과학기술원기계공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 한국과학기술원기계공학과 (공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 :순천향대학교 기계공학과 조교수

<관심분야>

잉크젯, 진동 등