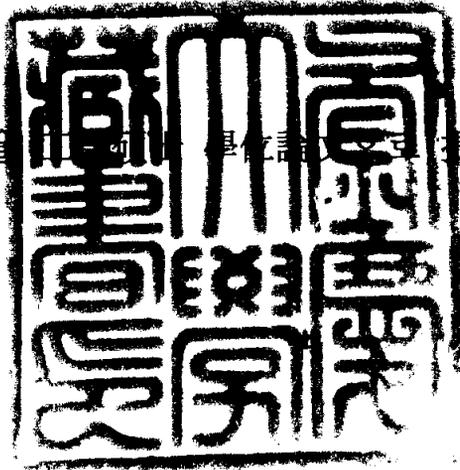


工學碩士 學位論文

有限要素法을 이용한 머플러 튜브의
타공공정 成形解析

指導教授 韓圭澤

이 論文을 韓圭澤 學位論文으로 提出함



2004年 8月

釜慶大學校 大學院

機械工學部 設計生產自動化工學 專攻

黃元湜

黃元滉의 工學碩士 學位論文을 認准함

2004年 6月 25日

主 審 工學博士 吳 明 錫



委 員 工學博士 陳 仁 泰



委 員 工學博士 韓 圭 澤



목 차

Abstract	iii
기 호 설 명	v
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 연구의 대상	2
1.3 연구의 목적 및 범위	4
제 2 장 이론적 배경	5
2.1 유한요소이론	5
2.2 연성파괴조건	8
2.3 요소제거기법	10
제 3 장 머플러 튜브 타공공정 유한요소해석	11
3.1 타공공정설계	11
3.2 유한요소모델	13
3.3 해석조건	15
제 4 장 타공성형실험	17
4.1 성형실험개요	17
4.2 실험장치의 구성	19
4.3 성형실험조건 설정	22

제 5 장 결과 및 고찰	23
5.1 유한요소해석 결과 및 고찰	23
5.1.1 타공성형 해석결과	23
5.1.2 클리어런스 변경에 따른 해석결과	32
5.1.3 편치형상 변경에 따른 해석결과	36
5.2 실험결과 및 고찰	42
5.3 유한요소해석과 실험결과의 비교	45
제 6 장 결 론	46
참고 문헌	47
감사의 글	50

Perforating Process Analysis of the Muffler Tube using Finite Element Method

Won-Sik Hwang

*Major of Design & Manufacturing Automation Engineering,
Graduate School. Pukyong National University*

Abstract

A muffler is an important part used to reduce noise and to purify exhaust gas in cars and heavy equipments. Recently there has been a growing interest in the design and manufacturing of the muffler tube due to the strict environment regulation. The shape of the muffler tube and the number of the tube hole has been made variously according to the weight and function of the car. The perforating at the muffler is to pierce tube in rows using punch and die.

The perforating process technique of the muffler tube has been largely affected by the die clearance and punch shape. In this study, finite element analysis has been carried out to predict an optimal forming conditions of the muffler tube using the DEFORMTM-3D. Also its simulation results were reflected to the forming process design for the muffler tube. The perforating process is performed in the longitudinal

direction of the tube. According to the simulation results, when the shear angle of punch was similar to the tube curvature, the optimal shape was obtained and the stress of punch was minimized. Also when the clearance of die was increased, die's stress was increased as well, and when the clearance of die was 0.1mm, the burr was minimized and optimal shear section was obtained.

기 호 설 명

τ_{MAX}	Max shear stress
σ_{MAX}	Max tensile stress
$\bar{\epsilon}$	Effective strain
$\dot{\epsilon}_{ij}$	Strain-rate tensor
$\dot{\bar{\epsilon}}$	Effective strain rate
$\dot{\epsilon}_V$	Volumetric strain rate
$\bar{\epsilon}$	Fracture strain
σ'_{ij}	Deviatoric stress tensor
t_i	Surface traction
v_i	Velocity vector
Π	Functional
$\delta\Pi$	Variation of functional
$\bar{\sigma}$	Effective stress
σ^*	Maximum component of principal stress
K	Tangential stiffness
R	External load vector
ΔU_i	Displacement vector
F^{i-1}	Internal force
τ_s	Friction shear stress
m	Constant shear friction factor
σ_s	Flow stress
C	Material constant
n	Strain hardening exponent

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

최근 들어 자동차와 중장비 등의 산업이 발전함에 따라 금속소재의 성형성과 이에 따른 공구의 변형이 중요하게 부각되고 있다. 금속소재를 성형하기 위한 방법 중의 하나인 전단공정이란 펀치와 다이를 이용하여 원하는 형상을 절단하는 가공방법이다. 전단가공은 치수 정밀도가 우수한 형상의 제품을 얻을 수 있고, 가공의 자동화를 이루기 쉬우며 대량생산에 적합하다. 하지만 전단공정의 설계가 숙련자의 경험과 직관에 의해 좌우됨으로써 표준화가 힘들고, 제조비용과 시간의 증가를 야기해 왔다. 이러한 문제는 최근에 컴퓨터의 급속한 발전과 더불어 유한요소법을 이용한 전단공정의 시뮬레이션을 통해 해결하려는 노력이 시도되고 있다.^{1)~4)} 이는 성형공정에 있어 이론적으로 결과를 예측하여 설계 단계에서 제품의 품질을 평가하고, 적절한 금형설계 방안을 제시하는데 이용되고 있다.

머플러에 있어 타공(perforating)이란 일정한 배열로 피어싱(piercing)하는 전단공정으로 연발적인 프레스(press) 가공이 이루어지는 작업이며, 제품의 수명을 높이고 결함을 방지하기 위해 금형의 내구성 증대 및 펀치(punch)와 다이(die)의 교체시기의 예측이 절실히 요구되는 공정이다. 튜브의 타공은 음압(音壓)과 음파(音波)를 감쇄시키는 구조로 되어 있어야 하며, 다열(多列)의 타공을 위해 정밀한 금형의 설계가 필요하다. 프레스 자동화와 성형의 정밀화로 인해 펀치와 다이를 이용한 평면소재의 전단 가공에 대해서는 광범위한 연구가 진행되고 있는 반면에 튜브(tube)와 같은 곡면의 전단에 대

해서는 그 구성인자와 변수에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

원통상태에서의 타공은 공정수의 단축과 품질의 향상이라는 두 가지 측면에서 장점을 가지고 있지만, 평면에서의 타공과 달리 원통 상태라는 조건과 소재가 회전하여 타공이 이루어지는 특수성 때문에, 펀치와 다이 그리고 가공조건에 따라 성형의 변화가 많은 공정이다. 현재 대부분의 튜브 상태의 타공기술은 경험과 시행착오에 의존하고 있으며 많은 시간과 비용이 들고, 표준화 되어 있는 자료가 부족한 실정이다. 따라서 공정의 수를 줄이고, 정밀한 타공을 할 수 있는 튜브 상태의 타공성형 공정의 최적조건을 찾는 것은 중요한 문제로 대두되고 있다. 이 문제의 해결을 위해서는 타공의 주요인자인 다이 클리어런스(clearance)와 펀치 형상의 변화에 따른 소재의 성형상태와 펀치, 다이의 영향에 대한 고찰이 필요하다.

1.2 연구의 대상

머플러(muffler)는 소음을 줄이고, 배기가스를 정화하는데 중요한 역할을 한다. 더욱이 엄격한 환경관련 규제로 인해 머플러의 기능을 최대화하기 위한 노력이 진행되고 있다. 특히 머플러의 기능에 직접적인 영향을 미치는 튜브(tube)의 형상과 홀(hole) 수는 차의 중량과 형태에 따라 다양하게 제조되고 있다.

기존의 머플러 튜브의 제조공정은 Photo 1과 같이 철판(sheet)에 타공작업을 한 후 벤딩(bending)과 롤링(rolling) 공정을 거친 후 용접(welding)을 하게 된다. 이러한 공정은 용접으로 인한 재료의 부식과 변형이 심하며, 또한 진원도의 유지도 힘든 문제이다.

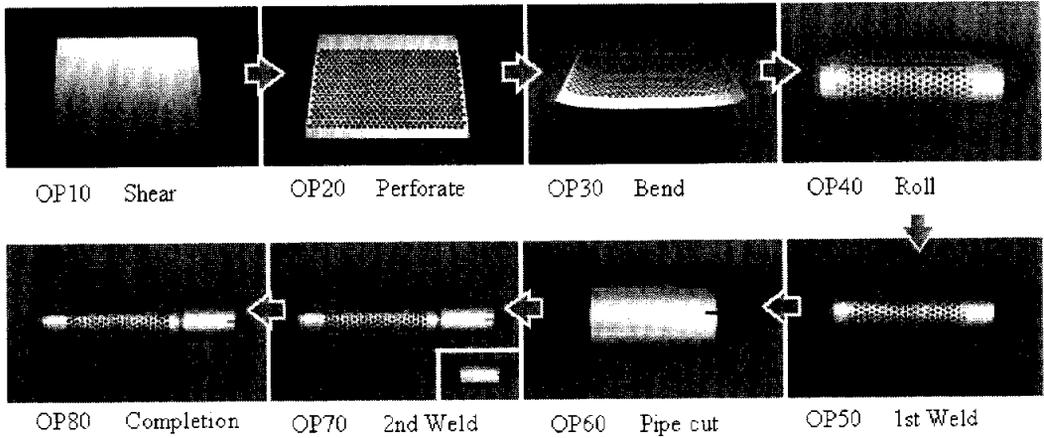


Photo 1 Sheet perforating process

따라서 본 연구에 있어서는 Photo 2와 같이 원통상태에서 머플러 튜브 타공 성형공정을 대하여 연구하였다. Photo 2에서 보는 바와 같이 튜브 상태에서의 타공공정은 공정이 간단하고, 생산성이 증대되며 제조비용이 줄어드는 장점이 있다.

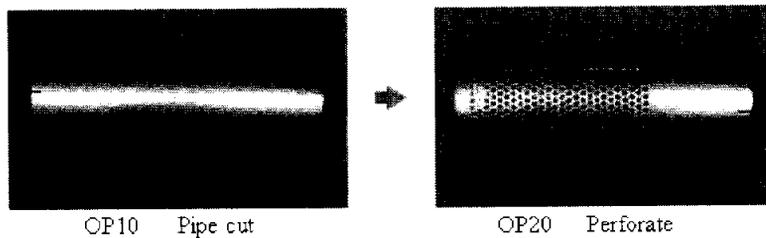


Photo 2 Tube perforating process

1.3 연구의 목적 및 범위

본 연구에서는 전단가공 공정에서 변형소재의 파괴와 전단면의 형성과정을 예측하기 위해 연성파괴 기준과 요소제거 기법^{5)~8)}을 도입하였으며, 튜브 상태의 타공에 있어 펀치의 스트로크(stroke)에 대한 재료의 변형을 수치 해석하였다. 상용 유한요소해석 소프트웨어인 DEFORM™-3D를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션^{9)~10)}을 통하여 타공공정의 구성 인자인 클리어런스의 변경에 따른 재료의 성형상태와 다이에 걸리는 응력을 분석하였고, 또한 펀치의 형상의 변경에 따른 펀치의 응력과 변형상태를 예측하여 제품의 성형과 금형에 미치는 영향¹¹⁾ 등의 성형결과를 분석하였다. 또한 실제 실험을 통한 성형 해석과 실제 작업을 비교하여 타공공정 설계의 기초 자료로 사용하고자 하였다. 그리고 앞으로 다양한 곡면을 가진 형태의 소재에서 전단공정의 유한요소해석은 제품의 정밀도 향상뿐만 아니라, 후가공 시간 및 공정의 단축 등의 효과^{12)~13)}를 얻기 위해 반드시 연구되어야 할 중요한 부분으로 사료된다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 유한요소이론

변형해석을 위하여 강-점소성 유한요소법을 이용하였다.

강-점소성 재료에 대한 범함수(functional) Π 는 다음과 같다.^{14)~15)}

$$\Pi = \int_V E(\dot{\epsilon}_{ij}) dV - \int_{S_t} \bar{t}_i v_i dS \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기서 E 는 점소성 포텐셜, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도, \bar{t}_i 는 표면력, v_i 는 절점속도를 나타낸다.

비압축성 조건을 고려하기 위하여 K (벌칙함수:penalty function)를 도입하면, 위의 식 (1)에 대한 일차 변분범함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta\Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_1 \delta\dot{\epsilon}_1 dV - \int_{S_t} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad \text{-----} \quad (2)$$

여기서, $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}}$ 로 정의되는 유효응력,

$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$ 로 정의되는 유효변형률속도,

σ'_{ij} = 편차응력

\bar{t}_i = 표면력

v_i = 절점속도

$\dot{\epsilon}_{ij}$ = 변형률속도

$\dot{\epsilon}_V$ = 체적 변형률 속도를 나타낸다.

위의 식 (2)는 유한요소 분할화 과정을 거치면 절점 속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴우톤-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용한다.

박관성형 공정해석에서의 강소성 재료(rigid-plastic material)는 시간 t_{0+1} 에서 필요충분조건으로 아래와 같이 응력장의 평형을 만족한다. 즉 내부일과 외부일이 같아진다.

$$\delta W_i^r = \int^T \bar{\sigma} \delta(\Delta \bar{\epsilon}) t^0 dA^0 = \delta W_0^r \quad \text{-----} \quad (3)$$

식 (3)을 이산화(discretization)하여 뉴우톤-랩슨법(Newton-Raphson method)에 의해 선형화된 식을 얻을 수 있다.

$$K \Delta U^i = R - F^{i-1} \quad \text{-----} \quad (4)$$

여기서, K는 접선 강성 계수(tangential stiffness)를 나타내고, R은 외력(external load vector)을 나타내며 ΔU_i 는 절점에서의 변위벡터(displacement vector)를 나타낸다. 그리고 F^{i-1} 는 i-1번째 축차에서의 내력(internal force)을 나타낸 것이다. 식 (4)의 축차계산(iteration method)은 다음과 같은 조건을 만족할 때까지 반복된다.

$$\|\Delta U\| / \|U\| \leq \delta \quad \text{-----} \quad (5)$$

여기서, $\|\cdot\|$ 는 유클리드 벡터 놈(Euclidean vector norm)을 나타내며 δ 는 임의의 작은 상수이다. 이와 같은 방법으로 초기 속도장은 직접 반복법을 이용하여 구한다.

편차, 다이와 재료 및 스토퍼에 사용된 마찰조건은 식 (6)을 사용하였다.

$$|\tau_s| = mK = m \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \quad \text{-----} \quad (6)$$

여기서, m 은 마찰계수(shear factor), σ_s 는 흐름응력(flow stress), K 는 전단 흐름응력(flow stress in shear)을 나타낸다. 윤활유를 사용한 냉간성형공정에서 m 값은 일반적으로 0.05~0.15이며, 본 연구에서는 0.08을 적용하였다.

해석에서의 구성방정식은 식 (7)과 같다.

$$\bar{\sigma} = C\bar{\epsilon}^n \quad \text{-----} \quad (7)$$

$\bar{\sigma}$ = 유효응력(effective stress)

n = 변형경화지수(strain hardening exponent)

C = 재료상수(material constant)

$\bar{\epsilon}$ = 유효변형률(effective strain)

2-2 연성파괴조건

유한요소법을 이용하여 전단 가공을 관찰하기 위해서는 파괴의 기본적 유형과 전단면의 형성 과정에 있어 파괴의 예측과 파괴의 진행 상태를 효과적으로 고려해야 한다. Cockroft¹⁶⁾ 등은 소성변형에너지 개념에 의하여 아래와 같은 연성파괴조건을 제안하였다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}} \sigma^* d\bar{\epsilon} = C_0 \quad \text{-----} \quad (8)$$

여기서, σ^* 는 최대 인장주응력 $\text{sup}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률 그리고 C_0 는 Cockcroft-Latham 상수이다. 이 조건은 파괴가 변형과 인장응력에 의존함을 의미하고 있다. 즉, 인장응력이 없다면 $\sigma^* = 0$ 이 되므로 파괴는 발생하지 않는다는 것이다.

기공성장개념에 의하면 기공의 크기가 임계치에 도달하면 파괴가 발생한다고 본다. 이에 의거하여 Oh¹⁷⁾ 등은 σ^* 를 $\bar{\sigma}$ 로 나누어 식을 다음과 같이 무차원화 시켰다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}'} \left(\frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon} = C \quad \text{-----} \quad (9)$$

이 식을 수정 Cockroft-Latham의 파괴조건이라 한다.

여기서, 전단가공 공정 동안 일어나는 파괴를 예측하기 위하여 다양한 하중조건에 적용될 수 있고, 실험적 접근 및 수치적 계산이 용이한 일반화 된 Cockroft-Latham의 연성파괴기준을 이용하였다.

전체적인 변형양상은 순수하게 전단(pure shear)으로 볼 수 있으며, 전단가공 공정 동안 주인장응력의 최대치 σ^* 와 유효응력 $\bar{\sigma}$ 의 비율이 일정하게 유지된다고 가정하면, 위 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int_0^{\epsilon_f} d\bar{\epsilon} \approx C^* \text{-----} \quad (10)$$

C^* 는 $C/(\sigma^*/\bar{\sigma})$ 이다. 위에서 언급한 재료상수 값은 실험적으로 결정되어야 하지만, 본 연구의 시뮬레이션에서는 반복적인 값의 대입을 통해 식의 C 의 값 즉, 유효변형률이 3.0에 도달한다고 가정하였다. 즉 변형률이 3.0에 도달했을 때 파괴가 일어난다고 가정한다. 이 값은 실험적으로 구한 것이 아니지만, 이러한 기준으로 전단 공정을 근사하게 보여줄 수 있다면 그 의미는 있다고 볼 수 있다.

2.3 요소제거기법

전단가공 공정에서 전단면의 형성과정을 수치적으로 접근하기 위하여 어떤 특정 요소의 유효 변형률의 값이 파괴 기준에 도달하면 이 요소에 대하여 요소제거기법을 적용하였다. 즉, 제거되는 요소의 강성 값에 감속인자(reduction factor)를 곱하여 강성 값을 매우 작게 만들어 다른 요소에 거의 영향을 미치지 못하도록 하였다. 이는 물리적으로 특별한 의미를 갖지는 않으며, 파괴현상을 수치 해석적으로 구현하는데 있어 가장 간편하기 때문에 이러한 방법을 선택하였다. 제거되는 요소의 크기는 매우 작아 전체 해에 미치는 영향은 거의 없다고 할 수 있으며, 오히려 응력 집중현상을 가속화하여 파괴현상을 구현하는데 촉진제 역할을 한다고 볼 수 있다.

이러한 해석기법은 파괴가 일어나는 변형의 각 단계에서 실제 파괴가 일어난 요소를 해석영역으로부터 제거하는 것이 아니므로, 변형소재의 영역을 다시 정의할 필요가 없다. 따라서 격자 재구성에 소요되는 시간을 줄일 수 있으므로 해석에 소요되는 시간도 줄어든다. 이와 같은 해석방법을 적용하여 전단가공 공정을 시뮬레이션 한다면 파괴 기준을 초과하는 요소들을 추적함으로써 전단가공에 나타나는 파괴의 기본적 유형과 전단면의 형성과정을 관찰할 수 있다.⁶⁾

변형경로의 각 스텝에서 계산된 절점 속도와 시간 증분으로 절점좌표가 변화되고, 유효변형률은 변형경로를 따라 적분된다. 변형경로의 각 스텝에서 변형률은 연성파괴의 발생여부를 판단하기 위해 연성파괴 기준식을 계산하는데 이용된다. 만약 파괴기준을 초과하는 요소가 나타나면, 그 요소에서 파괴가 일어난 것으로 간주하고, 앞서 제시한 요소제거 기법을 이용하여 계속적인 시뮬레이션을 수행하게 된다. 전단가공 공정에서 전단면의 형성과정을 수치적으로 접근하기 위해 어떤 특정요소의 유효 변형률의 값이 파괴기준에 도달하면 이 요소에 대하여 요소제거 기법을 적용하였다.

제 3 장 머플러 튜브 타공공정 유한요소해석

3.1 타공공정설계

Table 1은 본 연구에 사용된 튜브의 특성을 나타내며 비교적 넓은 구간의 타공 면적과 홀 크기 그리고 생산 수량을 감안하여 튜브의 타공공정은 일반적인 프레스 성형으로 공정을 설계하였다. 일반적으로 사용되고 있는 두께 2.0mm의 $\varnothing 101.6$ 규격 튜브를 성형을 위한 모델로 하였다. 튜브 소재의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Specification of the muffler tube

Diameter (mm)	Length (mm)	Thickness (mm)	Material	Perforating area (mm)	Hole diameter (mm)
101.6	430	2.0	SPCC	250	8

Table 2 Material properties of the muffler tube

Tensile strength (kgf/mm^2)	Yield point (kgf/mm^2)	Elongation (%)	Hardness (HRc)
Min 30	Min 18	Min 25	60

튜브상태의 소재에서 피어싱(piercing) 작업을 할 때, 튜브의 성형 상태를 관찰하기 위하여, Fig. 1과 같이 공정을 설계하였다.

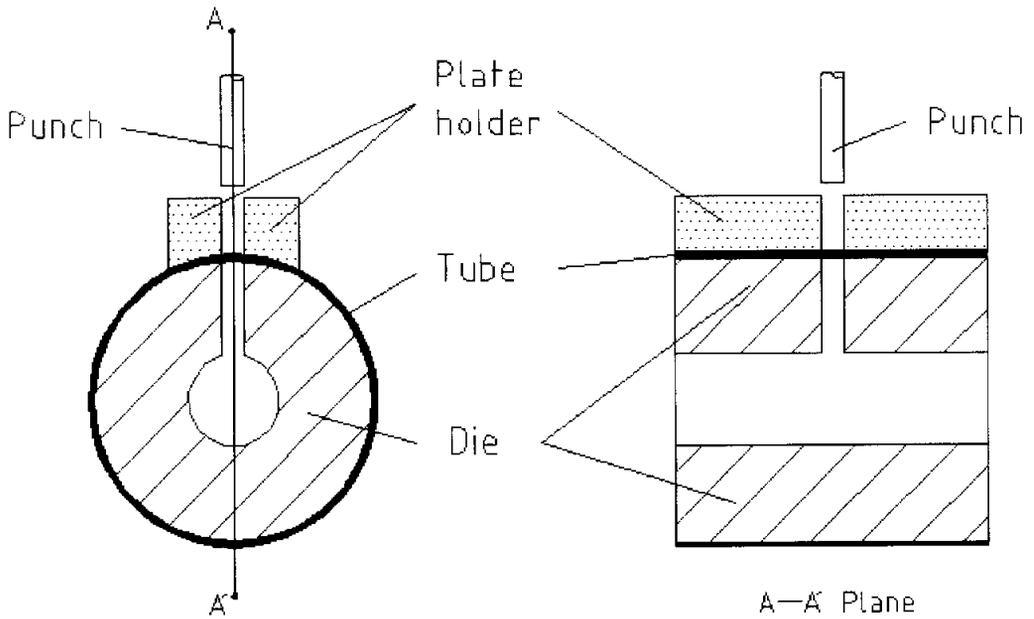


Fig. 1 Schematic illustration of shearing apparatus.

튜브 타공은 튜브를 길이 방향으로 놓은 후, 튜브의 내부에 원형인 다이를 삽입하고, 펀치가 수직으로 상하 작동함에 따라 튜브에 타공이 이루어 질 수 있도록 하였다. 튜브의 타공시 재료의 변형을 최소화하기 위하여, 튜브 타공면에 고정판(plate holder)을 두어 재료를 지지할 수 있도록 하였다. 실제 튜브의 타공에 있어서는 다열의 피어싱이 이루어지나, 타공의 특성상 펀치와 다이가 재료에 작용하는 공정조건이 동일하다고 판단하여 한 홀의 피어싱을 통해 전체의 타공공정에 확대 적용하고자 하였다.

3.2 유한요소모델

Fig. 2와 3은 머플러 튜브의 타공 해석을 위한 전처리 과정(pre process)중의 유한요소모델을 나타낸다. 상용 CAD 프로그램인 I-DEAS를 이용하여 $\varnothing 101.6$ 의 튜브의 일부와 $\varnothing 8$ 의 펀치와 다이 그리고 고정판을 모델링 하였다.

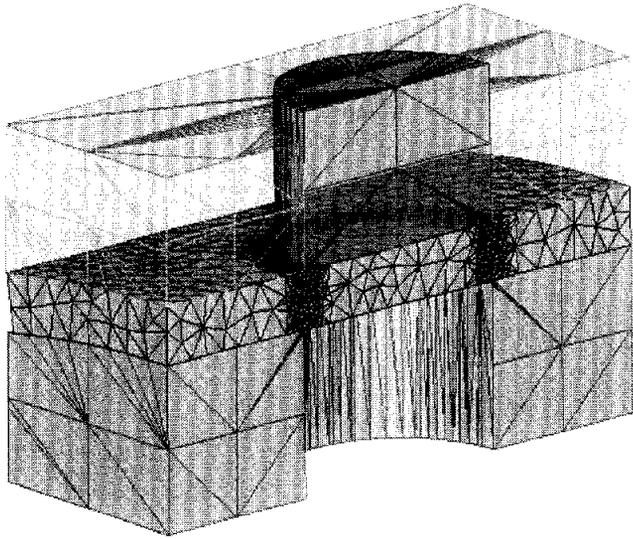


Fig. 2 Finite element model for tube analysis

튜브는 타공으로 인해 변형이 발생하는 홀 주변부만을 모델링 하였고, 응력의 집중이 일어나는 부위에 집중 메시(mesh)를 주어 전단되는 부위에 형태를 관측이 용이하도록 하였다. 타공에 따른 재료의 비틀림을 방지하기 위해 고정판은 소재와 펀치 사이에 위치할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 타공공정에서 소재의 변형을 관찰하기 위한 유한요소모델을 나타낸다. 소재는 강소성 재료로 가정하였고, 소재의 압연 방향에 따른 이방성은 고려하지 않았다. 펀치와 고정판, 다이는 강체로 가정하였다.

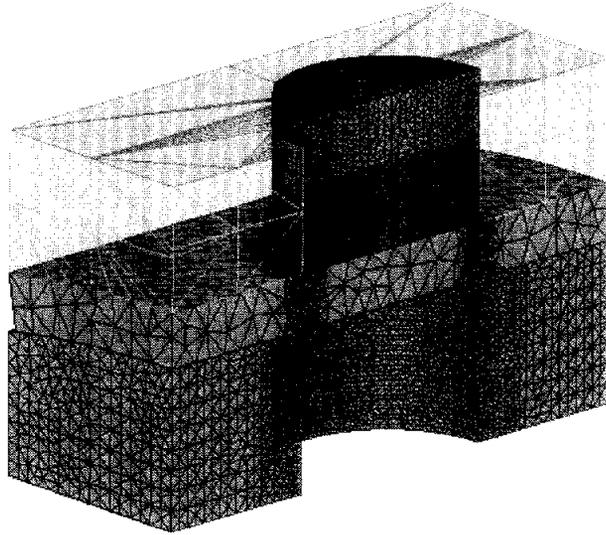


Fig. 3 Finite element model for punch and die analysis

Fig. 3은 타공공정에서 펀치와 다이에 걸리는 응력과 변형상태를 관찰하기 위한 유한요소모델을 나타낸다. 펀치와 다이는 탄성(elastic)체로 가정하고 메시를 주어 타공공정에서 펀치와 다이의 변형을 관찰할 수 있도록 하였다.

튜브 타공공정에서 2차원 모델해석으로는 튜브의 특성상 그 해를 일치하기에 문제점이 있어 3차원 모델해석을 통하여 그 해를 구하고자 하였다. 2차원 타공 해석시 실제 성형과 모델해석의 차이점은 다음과 같이 볼 수 있다.

첫째 성형해석시 축대칭 문제로 해석할 경우, 튜브의 특성을 정확하게 구현할 수 없다.

둘째 최적의 성형공정 도출을 위한 3차원 펀치 형상을 구현할 수 없다.

모델형상은 15열 배열의 타공 펀치와 다이의 한 부분과 튜브의 한부분만 모델링 하여 전체의 거동을 관측하도록 3차원 모델을 구성하였다.

3.3 해석조건

타공을 위한 펀치, 다이와 타공부의 물성치 및 해석에 사용된 상수와 공정 매개변수는 Table 3과 같다. 클리어런스 값과 펀치형상을 제외한 온도, 스트로크, 마찰계수 등의 다른 조건은 모두 동일하게 적용하였다.

Table 3 Condition of simulation

Parameter		Unit	Value
Material	Tube	-	SPCC
	Punch, Die	-	SKD-11
No. of elements	Tube	EA	25,000
	Punch	EA	31,000
	Die	EA	58,000
Temperature		℃	20
Number of steps		-	100
Stroke per step		mm	0.03
Friction coefficient		-	0.08
Corner radius		mm	0.1
Clearance		mm	0.05, 0.10, 0.15
Punch shape		-	Case 1, 2, 3

Fig. 4는 해석에 사용된 클리어런스를 나타낸 그림이다. 클리어런스의 조절은 다이 홀 직경의 변경만으로 행하였다. Fig. 5는 해석에 적용된 펀치형상을 나타낸 그림이다. Case 1은 펀치 접촉면이 튜브의 곡면과 같은 형상이고, Case 2는 펀치 접촉면이 평평한 상태이며, Case 3은 펀치 접촉면이 튜브의 곡면과 반대인 형상이다.

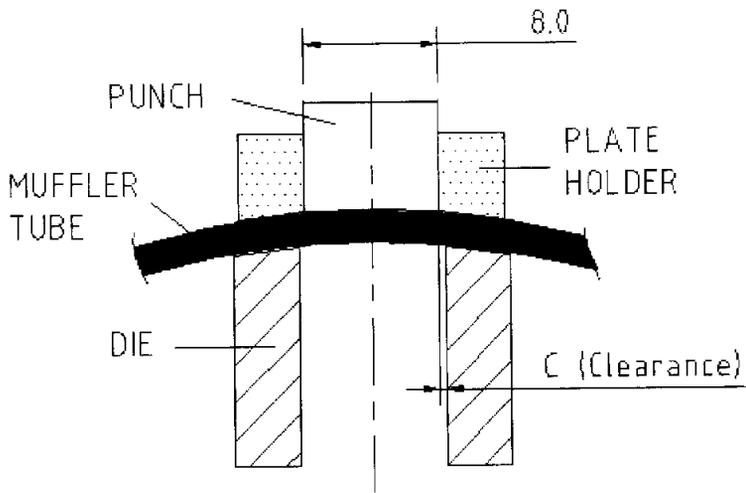


Fig. 4 Change of clearance

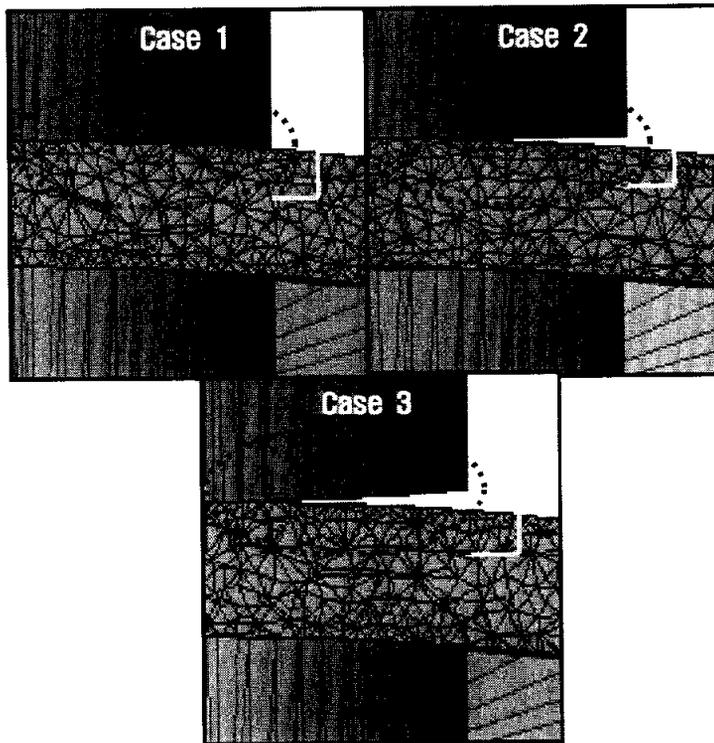


Fig. 5 Change of punch shape

제 4 장 다공성형실험

4.1 성형실험개요

실험에 사용된 머플러 튜브는 46ton 굴삭기(excavator)에 사용되는 부품으로 실제 명칭으로는 인렛트 튜브(inlet tube)이다. Fig. 6에서 A부에 해당하는 인렛트 튜브는 엔진으로부터 분출된 배기가스를 머플러에 전달하는 역할을 하며, 소음기의 기능이 이루어지기 위한 첫 번째 단계의 역할을 한다. Fig. 6은 실제 굴삭기에 사용되는 머플러를 모델링 한 모습이다.

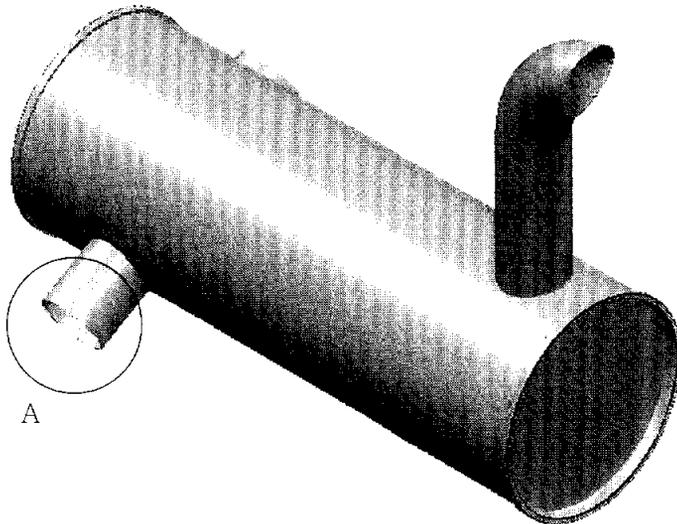


Fig. 6 Muffler for excavator

Table 4는 실험에 적용된 머플러의 사양 및 성능을 나타낸다.

실제 타공은 1열에 15홀씩, 2열을 1회에 타공 하도록 하고, 튜브를 회전시켜 전체적으로 타공이 진행되도록 하였다.

Table 4 Specification of the experimental muffler

Classification (ton)	Engine		Material	Maximum surface temperature (℃)	Diameter (mm)	Length (mm)	Inlet tube diameter (mm)
	Power (kw)	Back pressure (kPa)					
46 ton Excavator	245	10	SA1D	360	320	930	101.6

4.2 실험장치의 구성

Photo 3은 실험에 사용된 프레스의 모습이다. 금형의 크기와 타공에 걸리는 힘을 감안하여 200ton Mechanical press를 선택하였다.

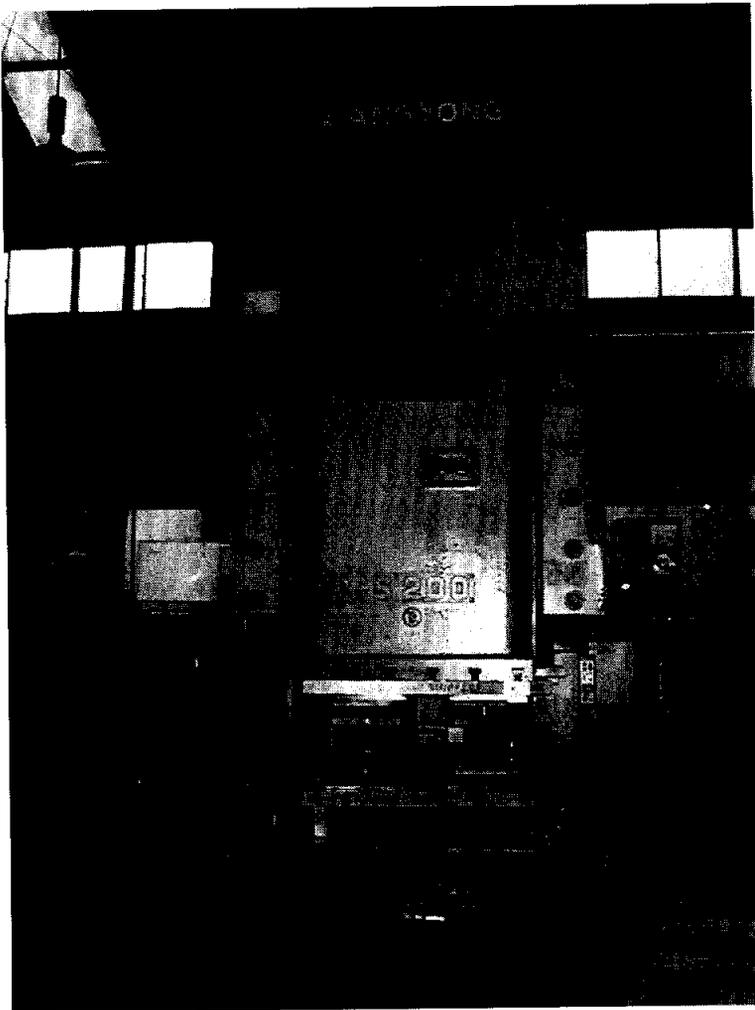


Photo 3 Mechanical press(200 ton)

Photo 4, 5는 실제 실험에 사용된 $\varnothing 8.1$ 과 $\varnothing 8.2$ 다이의 모습이다.

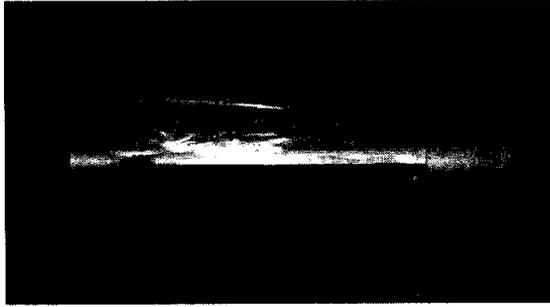


Photo 4 Perforated die($\varnothing 8.1$)

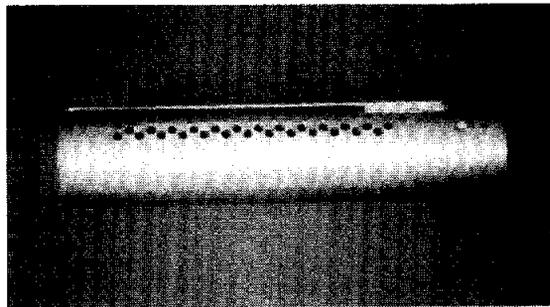


Photo 5 Perforated die($\varnothing 8.2$)

타공을 위해 다이의 홀 직경을 방전가공(EDW)을 이용하여 $\varnothing 8.1$ 과 $\varnothing 8.2$ 로 가공하였다. 다이의 중앙부는 중공으로 가공을 하여 스크랩(scrap)이 안쪽으로 떨어지게 하였으며 압축공기를 분사하여 취출이 가능하도록 하였다.

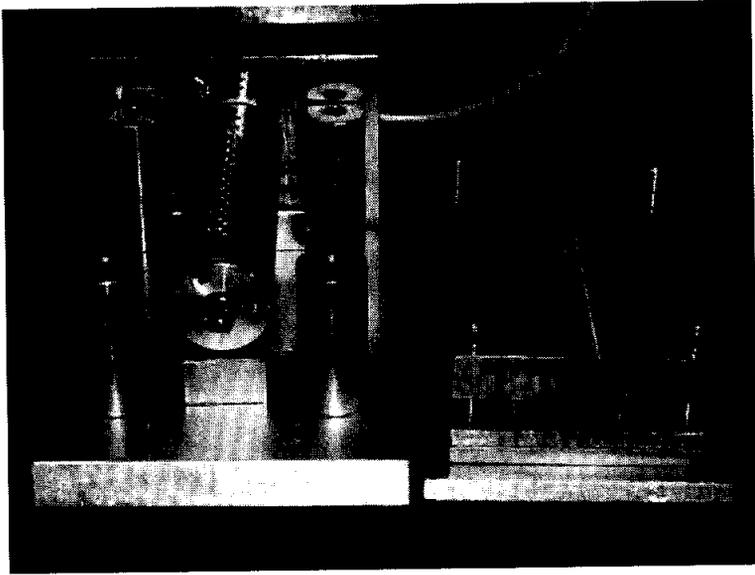


Photo 6 Perforating mold

Photo 6은 성형실험을 위해 완성된 타공 금형을 나타내고 있으며 펀치가 상하로 작동하여 하강하면서 길이방향으로 놓인 다이에 튜브가 삽입되어 타공이 이루어지도록 하였다.

4.3 성형실험조건의 설정

머플러 튜브의 타공성형 실험에서는 Table 5와 같이 타공에 가장 크게 영향을 줄 수 있는 요소인 다이의 클리어런스와 펀치의 형상을 실험 조건의 변수로 설정하였다.

Table 5 Condition of the experiment

Variable condition	die hole diameter	Ø8.1
		Ø8.2
	punch shape	Case 1
		Case 2

클리어런스 변경 실험에서는 Ø8.1과 Ø8.2의 두개의 다이를 변경하여 실험하였고, 펀치의 형상 변경 실험에서는 기계 가공한 후 열처리된 펀치를 교체하면서 실험하였다.

제 5 장 결과 및 고찰

5.1 유한요소해석 결과 및 고찰

5.1.1 타공성형해석

가) 변형해석 결과

Fig. 7에서 Fig. 10까지는 펀치의 하강에 따른 단계별 재료유동 및 내부 변화량을 보여준다. Fig. 7, 8에서 재료의 변형은 주로 전단이 되는 펀치와 다이의 접촉면에 집중적으로 발생함을 알 수 있었고, 변형량은 점차 증가하여 Fig. 8에서 최대가 되고, 다시 점차 감소함을 나타내었다. Fig. 10에서 보이는 바와 같이 타공으로 인해 변형이 일어난 부위는 전단면에 집중 되었으며, 변형량이 심한 곳은 재료 두께인 2mm 간격을 벗어나지 않음을 알 수 있었다. 이는 튜브의 타공 간격의 결정시 최소한 재료 두께 이상의 간격을 유지하는 것이 주변의 변형으로부터의 영향을 방지할 수 있는 방법이라고 사료된다. 튜브의 외측을 보면 타공으로 인해 처짐(roll over) 구간의 비율이 비교적 높게 나타남을 관찰할 수 있었다. 이는 튜브의 재료에 물성에 따른 영향이라고 여겨진다. 제품의 성형 결과는 도면의 치수를 만족하였으며, 변형량의 분포도 균일하게 발생함을 알 수 있었다.

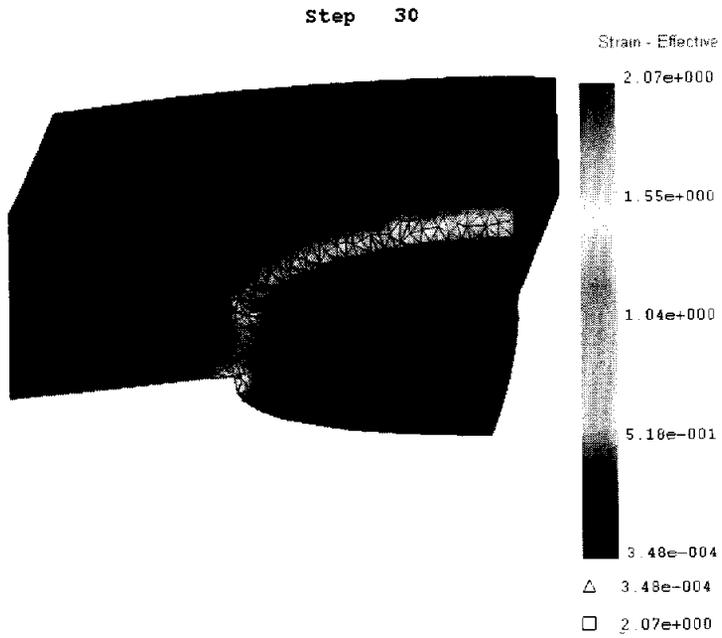


Fig. 7 Distribution of strain(step 30)

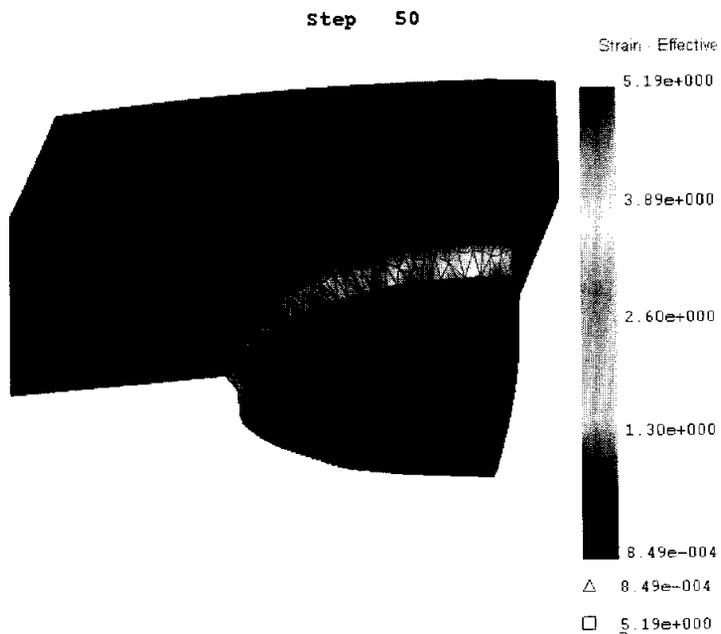


Fig. 8 Distribution of strain(step 50)

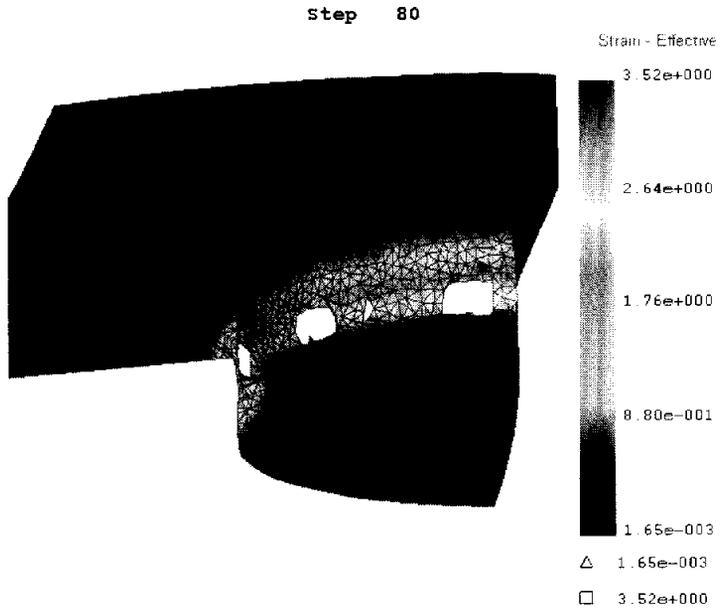


Fig. 9 Distribution of strain(step 80)

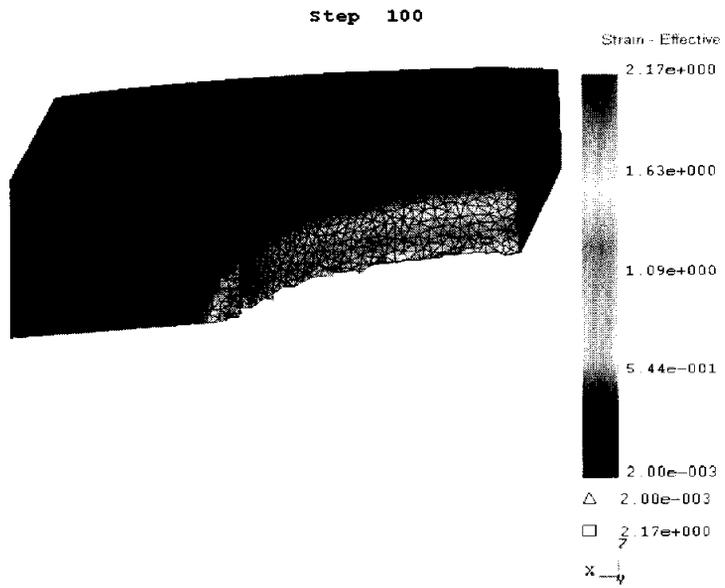


Fig. 10 Distribution of strain(step 100)

나) 응력해석 결과

Fig. 11에서 14까지는 재료의 단계별 응력분포를 나타내고 있다. Fig. 11, 12에서 재료에 걸리는 응력은 전단면을 따라 균일하게 형성됨을 보여주고 있지만, 파단이 나타나는 Fig. 13에서는 파단이 발생된 부위의 응력이 급격히 낮아지고 파단이 발생되지 않은 부위의 응력 값은 높게 분포되어 불균일하게 형성됨을 알 수 있었다. 전단이 진행되면서 잔류해 있던 내부응력은 이완되어 재료의 파단시 내부응력이 해소됨을 알 수 있었다. 이는 파단의 진행시 특정부위에 많은 응력이 편중될 수 있음을 보여준다. Fig. 15는 스트로크의 진행에 따른 하중과 스트로크의 관계를 나타내고 있다. 초기에는 소성변형으로 스트로크에 따라 하중이 일정한 비율로 증가하다가 파단발생 후 점차적으로 감소하는 경향을 볼 수 있었다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 다이에 작용하는 하중이 펀치에 작용하는 하중보다 상대적으로 큼을 알 수 있었고, 이에 공정설계에서 다이 측의 강도를 높이기 위한 방안이 필요하다고 여겨진다.

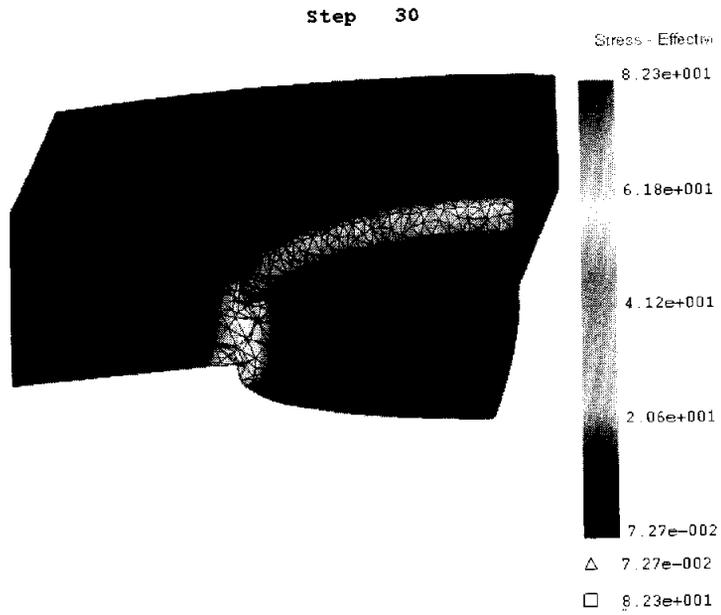


Fig. 11 Distribution of stress(step 30)

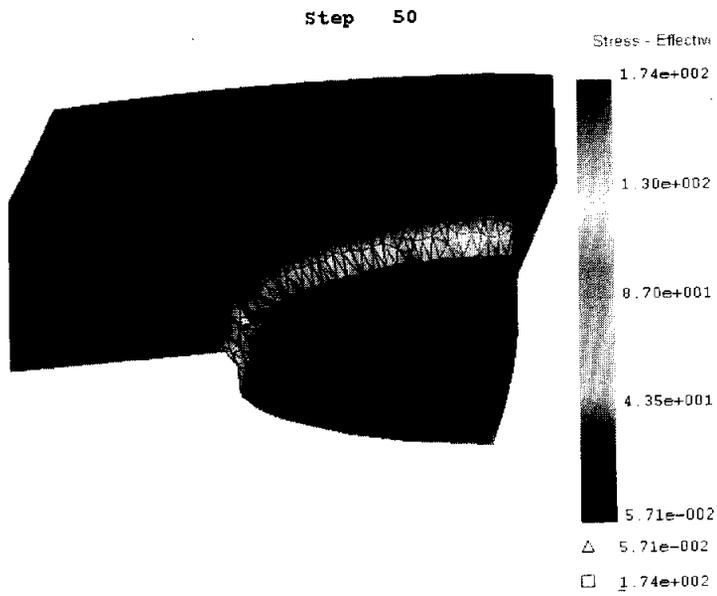


Fig. 12 Distribution of stress(step 50)

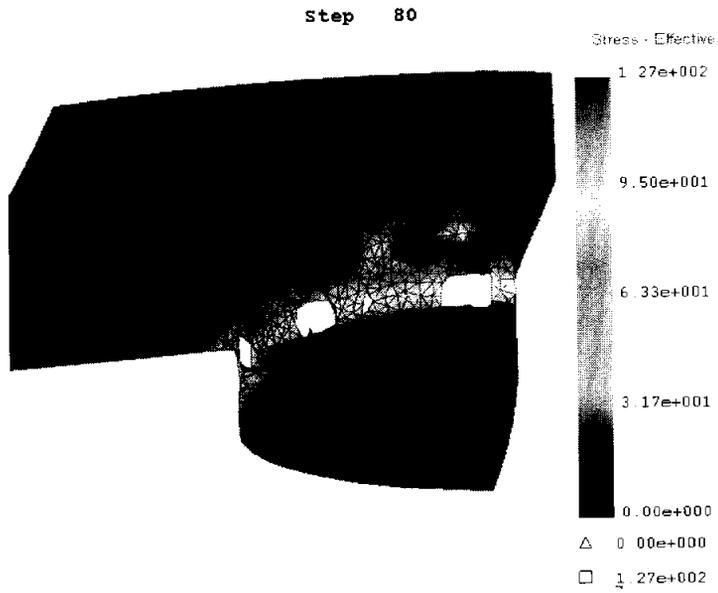


Fig. 13 Distribution of stress(step 80)

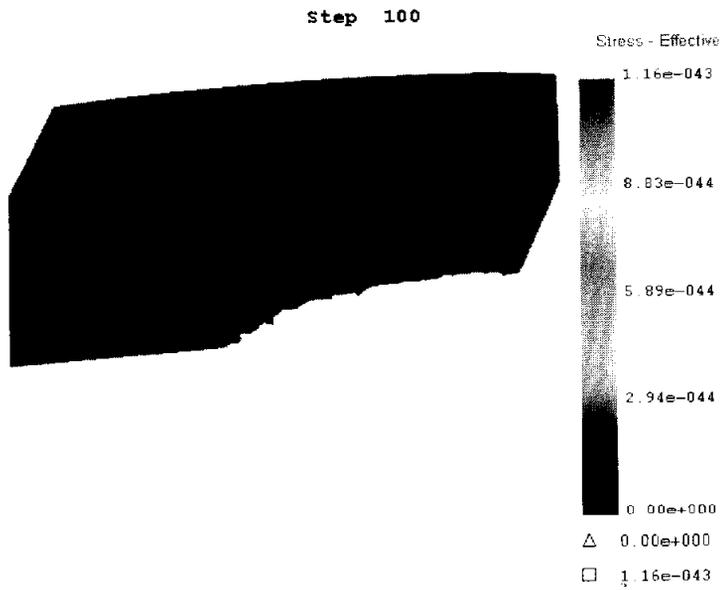


Fig. 14 Distribution of stress(step 100)

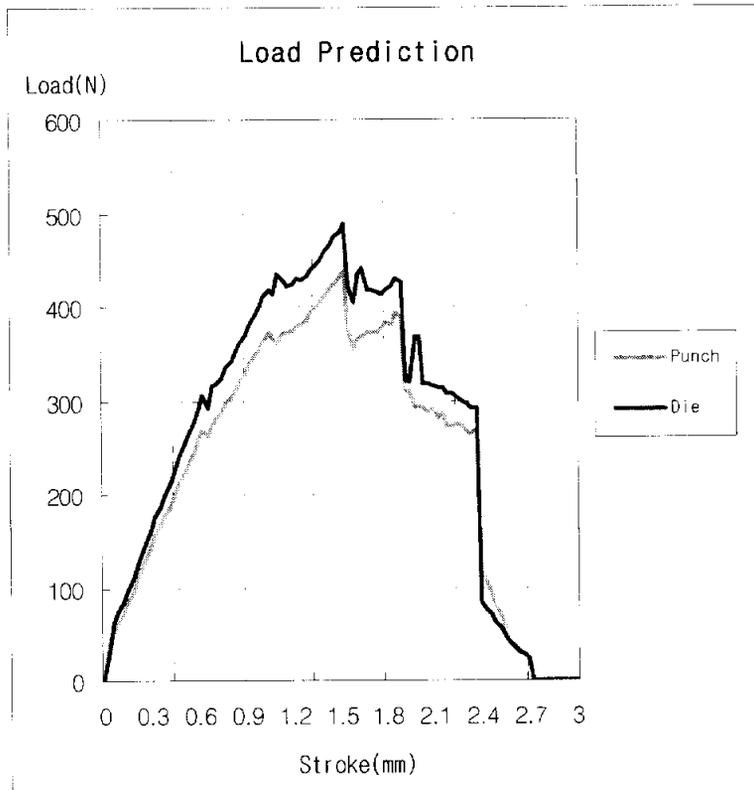


Fig. 15 Load-stroke curve

다) 속도분포 해석 결과

Fig. 16에서 Fig. 18까지는 펀치의 작동 후 소재의 속도 분포상태를 나타내고 있다. 곡면의 형상을 가진 튜브 소재에서 펀치가 수직으로 힘을 가할 때 그에 따른 소재의 속도분포를 나타내었다. 성형 초기 단계에서는 펀치의 하강 방향과 이에 수직인 튜브 소재를 밀어내는 방향으로 형성되며 전단이 시작되고 난 후에는 펀치가 하강하는 방향으로 속도분포가 집중됨을 알 수 있었다. 이는 다열의 타공에서 전단이 일어나기 전 재료의 유격이 발생할 요인이 있음을 유추할 수 있으며, 이를 방지하기 위해 금형 설계시 제품을 정확히 고정시킬 수 있는 가이드(guide)를 설치하는 것이 필요하다고 사료된다.

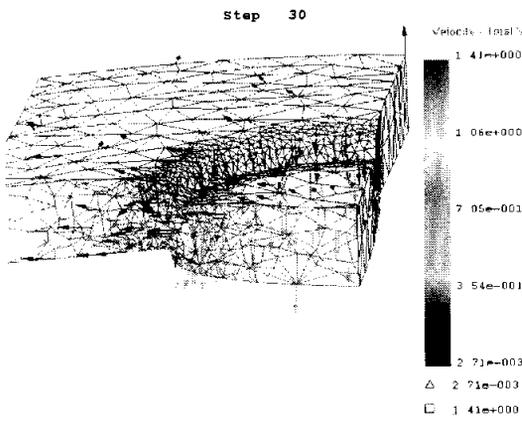


Fig. 16 Distribution of velocity(step 30)

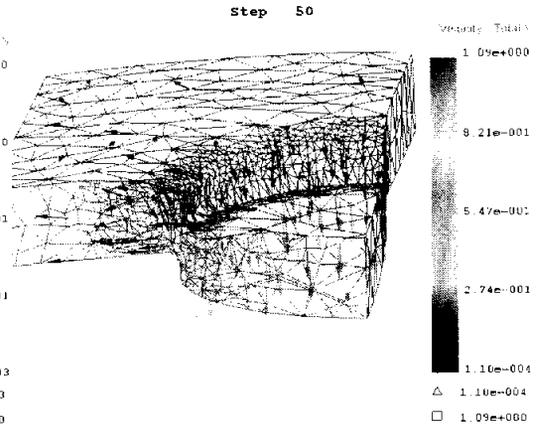


Fig. 17 Distribution of velocity(step 50)

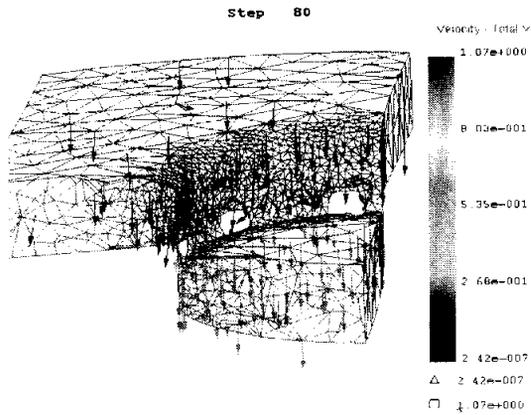


Fig. 18 Distribution of velocity(step 80)

5.1.2 클리어런스에 따른 성형해석

Fig. 19에서 24까지는 성형이 수행되는 동안 클리어런스의 변화에 따라 다이에 발생하는 응력을 단계별로 나타낸 형상이다. Fig. 19, 20에서는 클리어런스가 가장 좁은 0.05mm일 때의 다이 응력 값을 보여준다. 응력의 최대값은 가장 크고, 응력이 집중되어 있는 범위는 모서리부에 가장 집중되어 있음을 보여준다. 그러나 응력이 집중되어 있는 범위는 가장 좁음을 알 수 있다. Fig. 21, 22에서는 클리어런스가 0.10mm일 때의 응력 값을 보여준다. 응력의 최대값이 클리어런스 0.05mm일 때 보다 확연히 줄어들었고, 반면에 응력이 집중되어 있는 영역과 응력이 미치는 깊이가 증가함을 알 수 있었다. Fig. 23, 24에서는 클리어런스가 0.15mm일 때의 응력 값을 나타내는데 응력 값이 넓게 퍼지면서 분포되어 있음을 알 수 있었고, 응력을 받는 깊이도 가장 큼을 알 수 있었다. 그러나 응력의 최대값은 0.10mm일 경우와 큰 차이를 나타내지 않았다. 클리어런스에 따른 다이에 응력 분포 결과를 비교해 볼 때 0.10mm일 경우 최대 응력 값이 0.05mm에 비해 낮고 또한 0.15mm일 경우와 별 차이를 보이지 않으며 응력의 집중이 일어나는 부위도 일정함을 알 수 있어 가장 적합한 클리어런스 값이라고 사료된다. 금형의 내구성과 강도를 위해 금형의 일정 깊이까지 열처리가 행해져야 마모로부터 보호되어 질 수 있다는 것을 확인할 수 있었고, 클리어런스가 증가함에 따라 응력을 받는 깊이도 증가하여 열처리 깊이도 증가시켜야 함을 알 수 있었다.

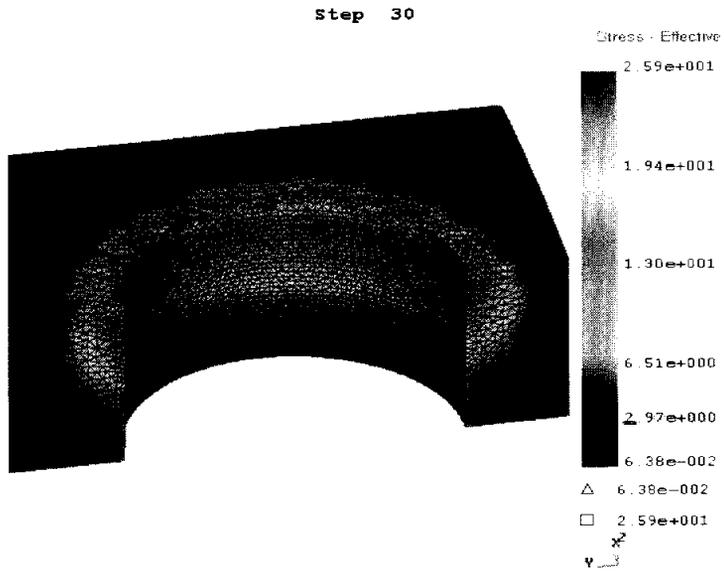


Fig. 19 Distribution of stress at clearance 0.05mm

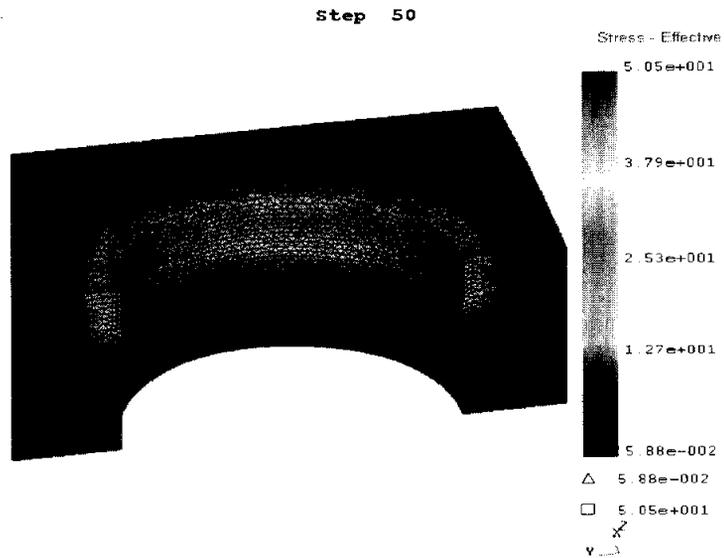


Fig. 20 Distribution of stress at clearance 0.05mm

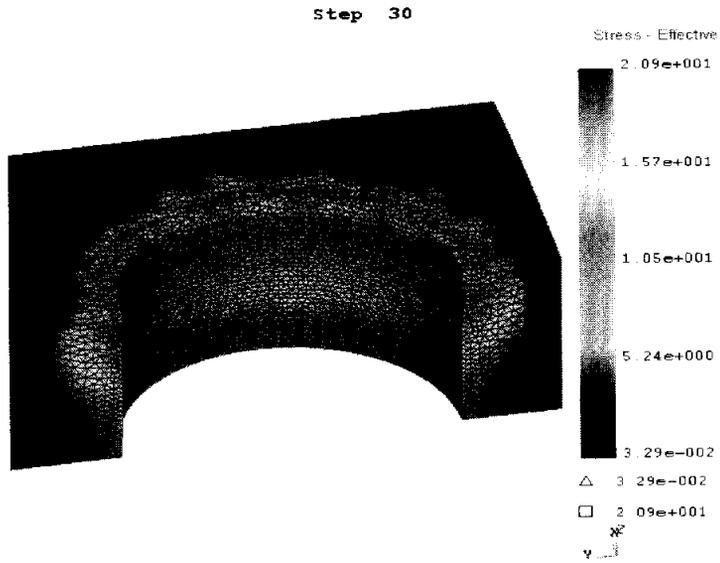


Fig. 21 Distribution of stress at clearance 0.10mm

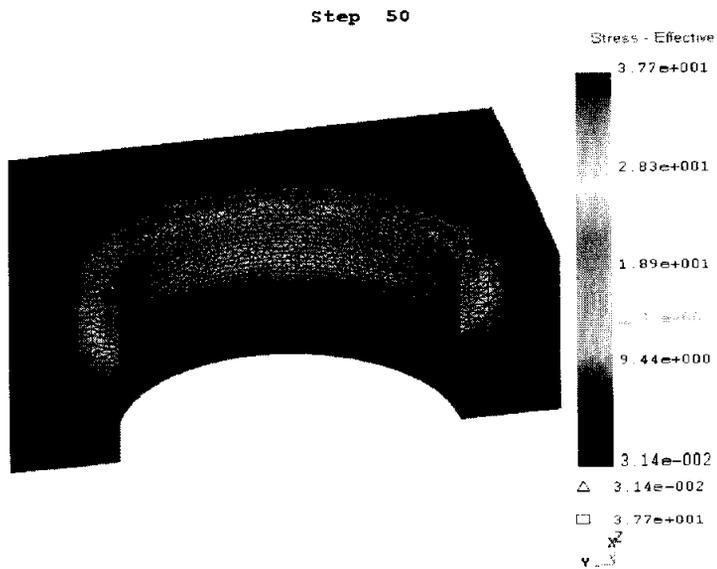


Fig. 22 Distribution of stress at clearance 0.10mm

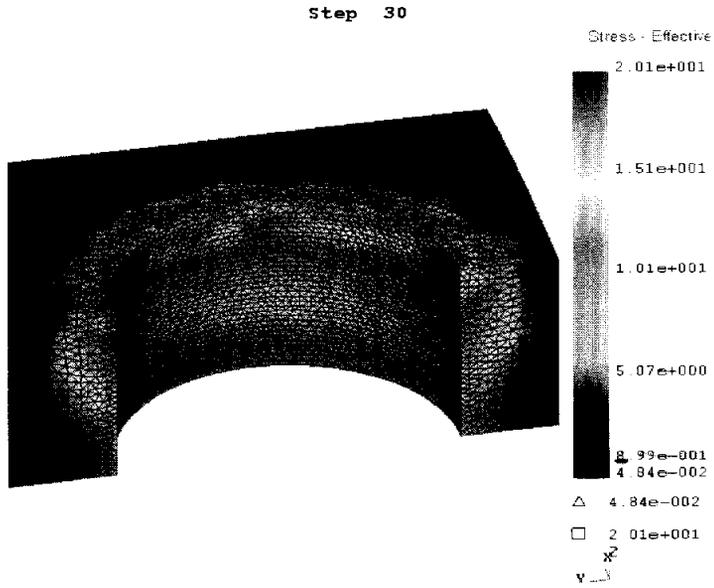


Fig. 23 Distribution of stress at clearance 0.15mm

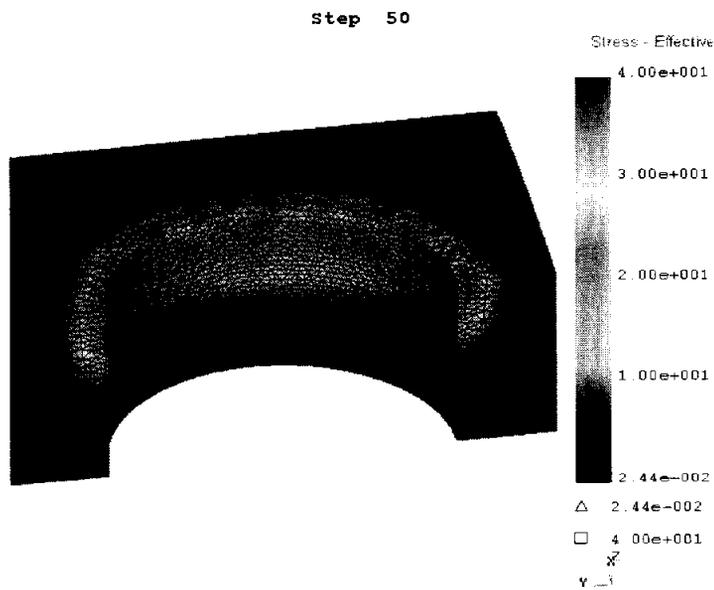


Fig. 24 Distribution of stress at clearance 0.15mm

5.1.3 펀치의 형상변경에 따른 성형해석

Fig. 25는 펀치가 하강함에 따라 펀치에 발생하는 하중의 변화를 나타낸 그래프이다. 펀치의 형상변경에 따라 3가지의 경우로 나누어 성형을 관찰하였고, Fig. 25에서 보는 바와 같이 펀치의 곡면형상과 가장 유사한 Case 1의 펀치 형상에서 가장 하중이 낮게 형성되어 있었고, 전단이 빠르게 이루어짐을 알 수 있었다. Fig. 26, 27은 Case 1에서의 펀치에 걸리는 응력을 나타낸 모습이다. 펀치에서 받는 응력 값은 하단부 펀치 모서리에서 중심축 방향과 측면을 따라 위쪽으로 분포가 퍼져나감을 볼 수 있었다. 이는 피어싱 펀치의 마모가 실질적인 피어싱 공정동안 펀치와 소재의 접촉에 의해 일어나는 마모와 펀치와 파단면 사이의 접촉에 의해 발생하는 마모로 구성된다고 생각할 수 있다. 실제 피어싱 공정은 생성된 파단부로 인해 피어싱 된 재료가 완전히 분리된 후에도 계속되는 펀치행정으로 펀치와 소재의 접촉에 의해 일어나는 마멸과 Fig. 27의 B부와 같이 재료가 완전히 파단된 이후에도 계속되는 펀치와 파단면의 접촉에 의해 발생하는 마멸이 복합적으로 작용한다고 생각된다. 특히 유효응력값의 분포에서 펀치 모서리 라운드 부에서 높은 변형률이 존재하고 펀치의 곡률부에 변형이 집중됨을 알 수 있었고, 펀치에 걸리는 응력 값의 범위는 가장 넓게 분포하고 있으며, 재료에 걸리는 응력도 펀치 모서리 라운드 부를 중심으로 퍼져 있음을 알 수 있었다. Fig. 28, 29는 Case 2에서 펀치에 걸리는 응력을 나타낸 모습이다. 응력의 분포가 Case 1보다 넓고 깊음을 알 수 있었고, 모서리 부위에 불균일한 응력분포를 나타내고 있었다. Fig. 30, 31과 같이 튜브의 곡면형상과 반대인 Case 3에서 가장 많은 응력이 펀치와 다이에 집중함을 관찰하였고, 응력이 불규칙한 부분이 발견되었으며, 그 깊이도 가장 깊음을 알 수 있었다. 또한 재료의 곡면과 반

대의 곡면을 갖는 Case 3에서 초기에는 낮은 분포로 응력이 가해지지만 파단이 진행되면서 가장 큰 응력 값이 형성되어 있음을 보여준다. 피어싱 공정에서 파단이 일어나기 전의 변형은 재료의 굽힘 변형이 지배적으로 작용함으로써 펀치의 곡률부에 마모가 심하게 일어남을 알 수 있다. Case 3에서 펀치와 재료의 접촉부의 형상은 재료의 접촉부의 형상은 재료의 굽힘 변형을 가장 심하게 일으킬 수 있는 형상이므로 재료의 굽힘으로 인한 접촉으로 펀치의 하단 접촉면에 응력값이 집중됨을 관찰할 수 있고, 또한 파단이 시작된 후에 펀치의 측면과 재료의 접촉에 따라 펀치 측면과 재료의 접촉에 따라 펀치 측면의 마멸에 영향을 미친다. 따라서 Fig. 31에 C부위에 마멸이 가장 심하다는 것을 알 수 있었다. 펀치형상에 따른 응력의 분포로 보아 튜브의 형상과 펀치의 접촉면간의 간격이 차이를 보일수록 응력의 분포 또한 불균일하게 분포됨을 알 수 있었다. 피어싱 펀치의 마모는 피어싱 펀치의 형상에 따라 많은 차이를 갖게 되며 특히 피어싱 펀치와 재료의 접촉면의 제어가 펀치의 마모에 중요한 영향을 미치는 인자로 작용한다는 것을 알 수 있었다.

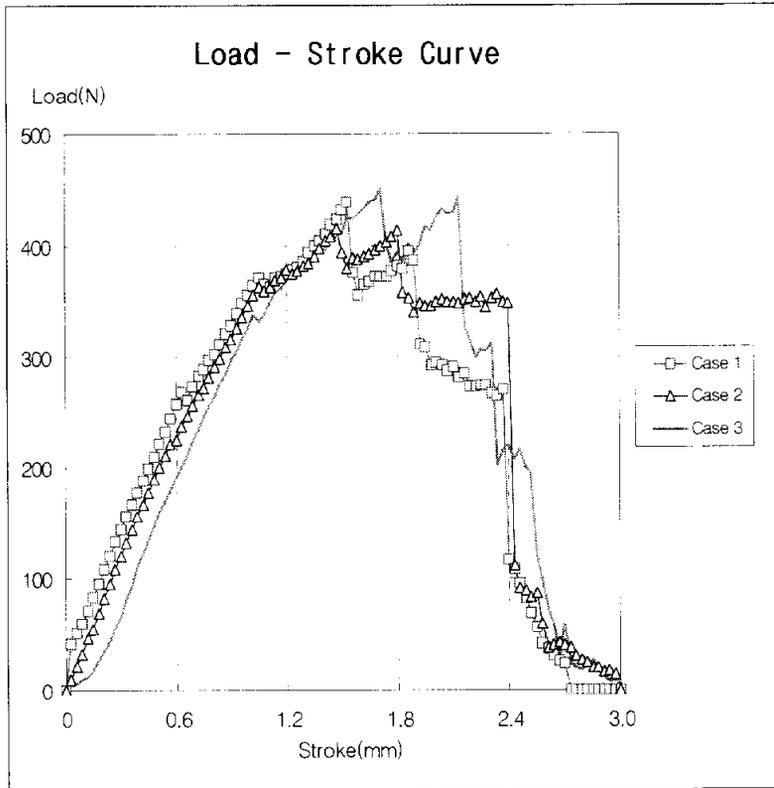


Fig. 25 Distribution of Load

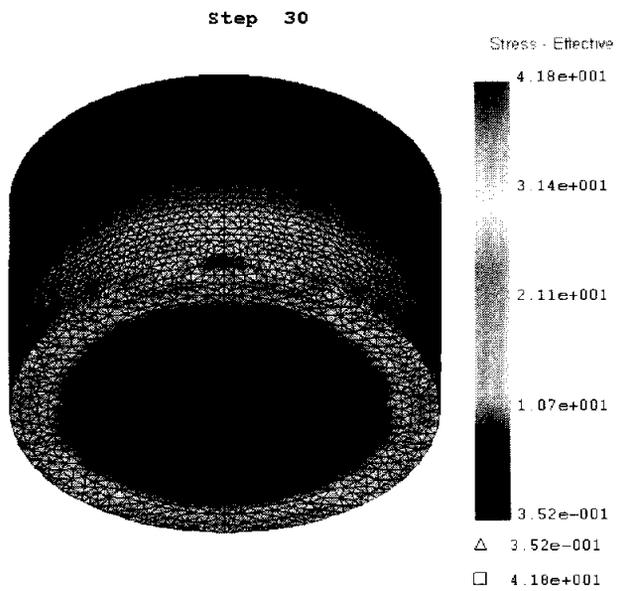


Fig. 26 Distribution of stress in case 1

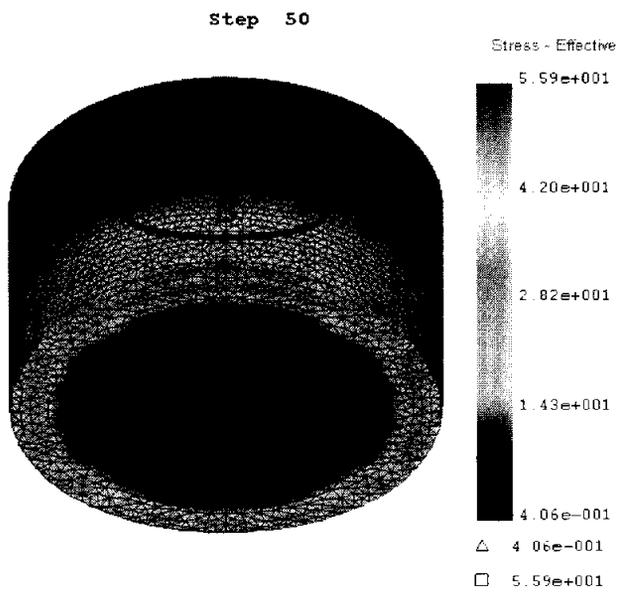


Fig. 27 Distribution of stress in case 1

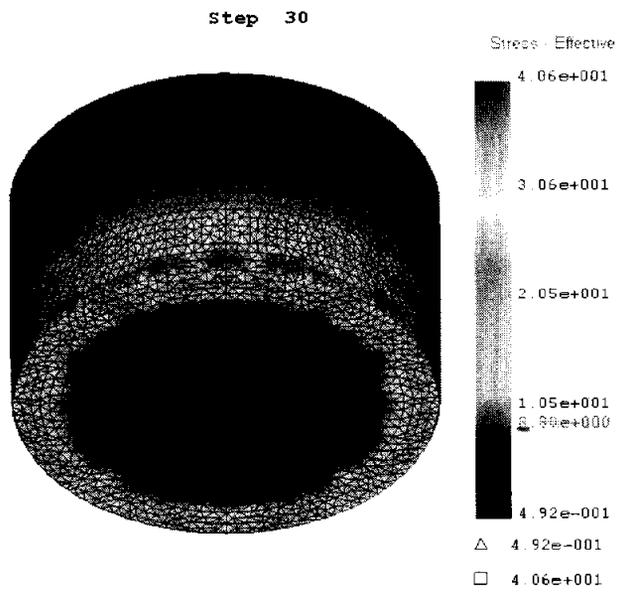


Fig. 28 Distribution of stress in case 2

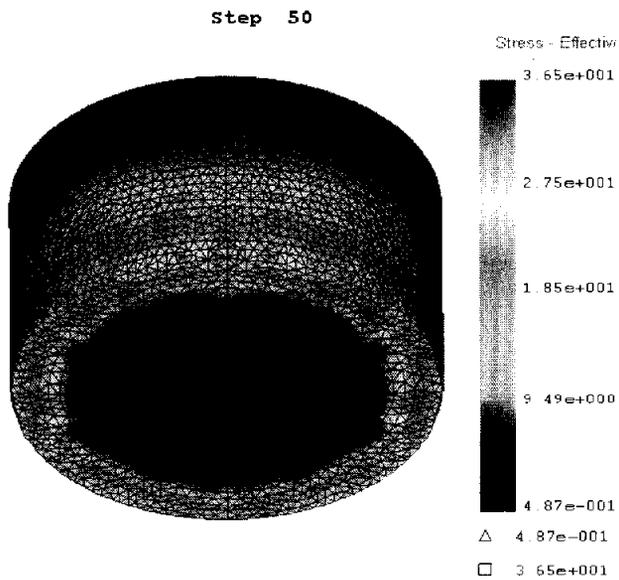


Fig. 29 Distribution of stress in case 2

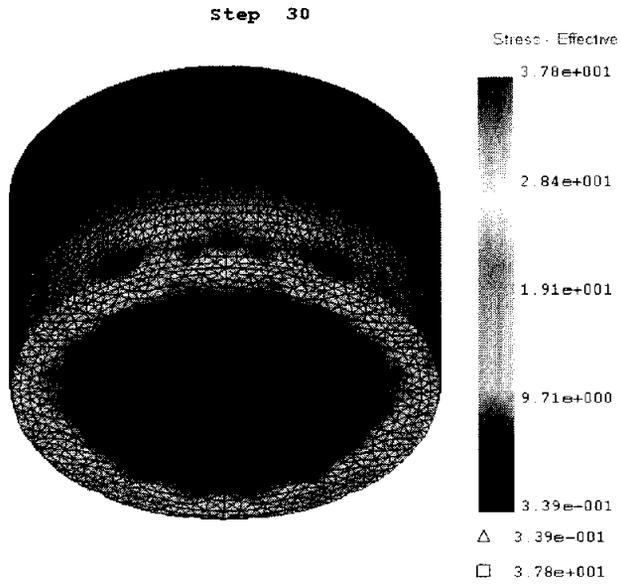


Fig. 30 Distribution of stress in case 3

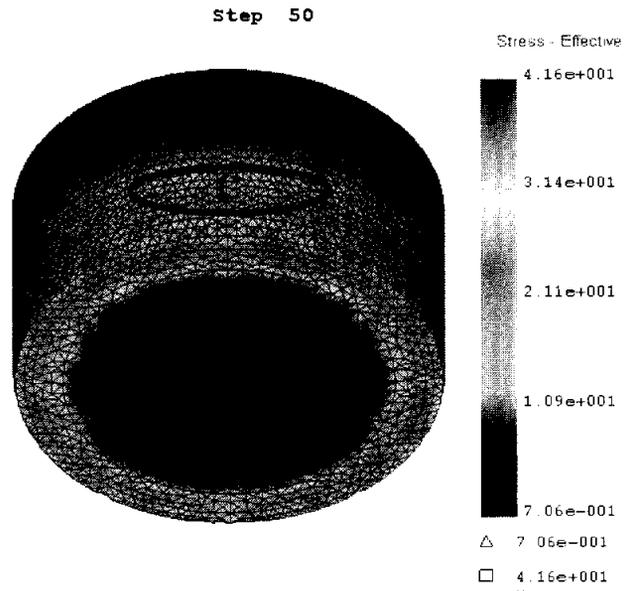


Fig. 31 Distribution of stress in case 3

5.2 실험결과 및 고찰

실험성형조건인 클리어런스 0.05mm인 다이에서 타공 실험을 실시하였을 경우, 처음에는 성형 후 제품이 원하는 형상으로 나타났지만, 몇 번의 타발 후 제품이 금형에 밀착이 심하게 밀착하게 되어, 제품의 타공을 위해 튜브를 회전하려 하였지만, 회전 도중에 제품이 다이와 밀착이 되어 제품의 성형시간이 증가하는 문제가 발생하였고, 또한 Photo 7과 같이 다이에 과중한 힘이 가해져 다이의 파손으로 이어졌다.

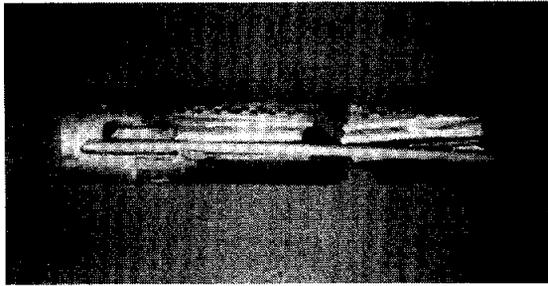


Photo 7 Perforated muffler tube

실제 실험에서 클리어런스 0.10mm로 작업했을 시 요구하는 형상을 얻을 수 있었고, 또한 제품의 형상도 Photo 8과 같이 도면형상과 일치하였다.

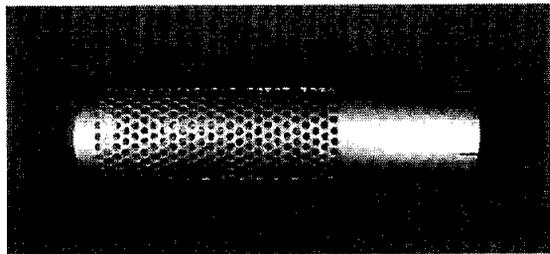


Photo 8 Perforated muffler tube

Photo 9는 타공된 부위를 나타낸 사진이다. 사진에서 보이는 바와 같이 한 홀의 피어싱은 다른 홀의 피어싱에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 성형실험에서 근접 홀 간의 최대거리는 재료두께보다 값이 큰 3.35mm로서 타공성형을 위한 조건으로 적합하다고 사료된다. 해석결과에서 볼 수 있듯이 튜브의 외측은 타공으로 인해 처짐(roll over) 구간이 나타남을 관찰할 수 있었다.

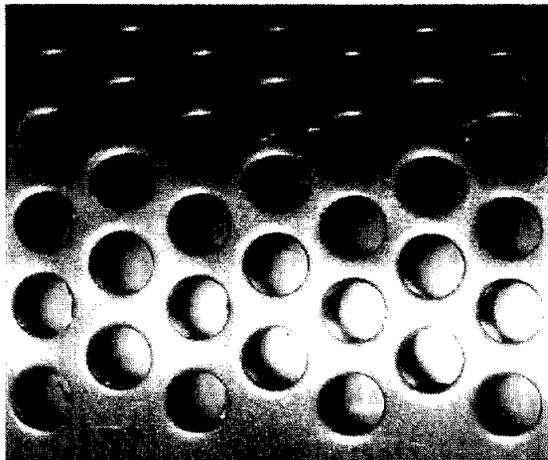


Photo 9 Perforated hole of muffler tube

Photo 10, 11은 Nikon eclipse Me 600 광학 현미경과 Nikon coolpix 990 digital 카메라를 연결하여, 타공 작업된 부품의 단면을 현미경 배율 300배로 확대하여 찍은 것이다. 재료의 전단면에 전단이 일어난 부분과 파단이 일어난 부분을 나타내고 있다. 사진에서 전단면과 파단면의 비율을 비교해 보면 약 60% 이상이 전단면을 차지하고, 하단의 파단 영역이 차지하는 비율이 낮음을 알 수 있었다.



Photo 10 Sheared surface in case 1



Photo 11 Sheared surface in case 2

5.3 유한요소해석과 실험결과의 비교

유한요소해석과 성형실험에서 튜브를 타공함에 있어 주요하게 영향을 미치는 변수인자들을 비교하여 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다. 유한요소해석에 나타난 전단면의 형상과 유사하게 실제 실험에서도 전단되는 부위의 비율이 파단면에 비해 비율이 높게 나타났고, 소재의 치짐 구간이 형태가 유사함을 확인할 수 있었다. 성형실험에서 밝혀진 타공부 주변의 변형부위는 실제 해석에 의한 변형부위와 비교적 일치하였다.

클리어런스 0.10mm에서 가장 최적의 유한요소해석 결과를 나타내었으며, 실제 성형실험에서도 성형부위가 도면의 치수에 가장 적합하였다. 일반적인 평면에서의 피어싱 작업과는 달리 튜브형태의 타공에 있어서는 전단의 각도와 변형의 특수성으로 인해 일반적인 전단의 클리어런스보다 큰 값이 필요함을 발견할 수 있었다. 또한 Case 1의 경우에서 성형 전단면이 가장 일정하게 나타남을 알 수 있었고, 튜브의 전단에 있어서 가장 적합한 펀치형상으로는 튜브의 형상과 유사한 형태의 시어 각(shear angle)이 주어질 때 성형에 걸리는 힘과 펀치의 마모정도가 최소화됨을 알 수 있었다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 머플러 튜브의 타공공정에 대한 유한요소해석과 실험을 통해 최적의 성형공정 조건을 제시하였다. 해석은 실제 사용재료로 하고 있는 SPCC를 사용하였고, 클리어런스와 펀치형상 등을 변화시키면서 성형해석 및 실험을 실시하였으며 공정에 대한 유한요소해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 튜브상태의 타공에서 소재에 걸리는 응력은 전단면 주변에 집중되었고, 변형이 심한 곳은 재료 두께인 2mm 간격을 벗어나지 않음을 알 수 있었으며 다열의 타공 작업을 위해서 근접 홀 간의 거리는 최소한 재료 두께 이상의 간격을 유지해야 안전할 것으로 판단된다.
- (2) 타공작업에서 다이에 작용하는 하중이 펀치에 작용하는 하중보다 상대적으로 큼을 알 수 있었고, 이에 공정설계에서 다이 축의 강도를 높이기 위한 방안이 필요하다고 사료된다.
- (3) 유한요소해석과 실험을 통하여 $\varnothing 101.6$ 의 튜브의 $\varnothing 8$ 의 타공 배열에서 클리어런스가 0.10mm일 경우 다이의 최대 응력 값이 0.05mm에 비해 낮고, 또한 0.15mm일 경우와 별 차이를 보이지 않으며 응력의 집중이 일어나는 부위도 일정함을 알 수 있어 최적의 클리어런스 값이라고 사료된다.
- (4) 튜브의 형상과 펀치의 접촉면간의 간격이 차이를 보일수록 응력의 분포 또한 불균일하게 분포됨을 알 수 있었고, 튜브의 형상과 펀치의 접촉면 형상이 유사할수록 펀치의 응력분포가 균일하게 나타나고 펀치에 미치는 하중도 낮게 나타났으며 최적의 성형제품을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Etienne Taupin, Jochen Breitling, Wei-Tsu Wu and Taylan Altan, "Material fracture and burr formation in blanking results of FEM simulations and comparison with experiments", Journal of Materials Processing Technology 59, pp.68~78, 1996.
2. Jochen Breitling, Victor Chernauskas, Etienne Taupin, Taylan Altan, "Precision shearing of billets-special equipment and process simulation", Journal of Materials Processing Technology 71, pp.119~125, 1997.
3. M. Samuel, "FEM simulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process", Journal of Materials Processing Technology 84, pp.97~106, 1998.
4. D. Brokken, W.A.M. Brekelmans, F.P.T. Baaijens, "Numerical modelling of the metal blanking process" Journal of Materials Processing Technology 83, pp.192~199, 1998.
5. H. Takuda, K. Mori, H. Fujimoto, N. Hatta, "Prediction of forming limit in bore-expanding of sheet metal using ductile fracture criterion", Journal of Materials Processing Technology 92-93, pp.433~438, 1999.
6. 고대철, 이진희, 김병민, 최재찬, "금속성형공정에서 연성파괴예측", 한국소성가공학회지 제3권 제2호 pp.167~177. 1994.
7. Dae-Cheol Ko, Byung-Min Kim, Jae-Chan Choi, "Finite-element

- simulation of the shear process using element-kill method”, Journal of Materials Processing Technology 72, pp.129~140, 1997.
8. F. Faura, A. Garica, M. Estrems, "Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process", Journal of Materials Processing Technology 80-81, pp.121~125, 1998.
 9. Scientific Forming Technologies Corporation, DEFORM™-3D User's Manual, 1995.
 10. E. Ceretti, M. Lucchi, T. Altan, "FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation" Journal of Materials Process Technology 95, pp.17~26, 1999.
 11. 고대철, 김병민, "유한요소법에 의한 전단가공 금형 마멸예측", 한국정밀공학회지 제16권 제1호, pp.174~181, 1999.
 12. 신용승, 김병희, 김현영, 오수익, "박판전단시의 버 형성에 관한 연구", 한국정밀공학회지 제19권 제9호, pp.166~171, 2002.
 13. 한규택, 서종근, 조영석, "박판의 슬리팅가공에서 전단면에 미치는 가공인자에 관한 연구", 한국정밀공학회 2000 춘계학술대회논문집, pp.144~147, 2000.
 14. Kobaysahi, S., Oh, S. I and Alton, T., "Metal forming and the finite element method", Oxford University Press. 1989.
 15. T. C. Lee, I. C. Chan and P. F. Zheng, "Application of the Finite Element Deformation Method in the Fine Blanking Process", Journal of

Materials Process Technology 63, pp.744~749, 1997.

16. M. G. Cockcroft and D. J. Latham, "Ductility and the workability of metals", J. Inst. Metals.. Vol. pp.33~39. 1968.

17. S. H. Jeong, J. J. Kang and S. I. Oh, "A Study on Shearing Mechanism by FEM Simulation", Seoul National University, Seoul, Korea, 1995.

후 기

본 연구에 많은 도움을 주신 (주)한일정공에 깊은 감사의 뜻을 표합니다.

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 연구의 방향을 가르쳐 주시고, 연구 활동에 든든한 힘이 되어 주시고, 바쁘신 가운데도 많은 관심과 가르침을 아끼지 않으셨던 한규택 지도교수님께 머리 숙여 감사드립니다. 그리고 본 논문의 심사를 위해서 세심한 지도와 조언을 해주시고, 논문의 완성을 위해 애써주신 오명석 교수님과 진인태 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 아울러 부족한 저에게 많은 가르침을 주신 기계공학부 교수님들께 감사를 드립니다.

대학원 진학과 학업에 대해 걱려를 아끼지 않으셨던 (주)한일정공 호문의 사장님께 감사를 드리고, 본 논문을 위해 많은 자료의 제공과 세심한 배려로 도와주신 윤종희 차장님과 회사 동료 여러분께도 고마움을 전합니다.

굳은 결의로 시작한 대학원 생활에 빠르게 적응할 수 있도록 따뜻한 조언과 충고로 이끌어준 영석, 찬용에게 깊은 고마움을 전하고, 석사과정동안 동고동락하며 어려운 시기에 희망과 용기를 준 정식에게 앞날에 성공과 영광이 있기를 바라며, 선배들 졸업을 위해 옆에서 도움을 주었던 소원, 석대 그리고 실험실 생활을 함께 한 후배들과 동규, 정민, 민수, 호운에게도 고마움을 전합니다.

끝으로 항상 저의 앞날을 바른 길로 인도해 주시고 사랑과 격려로 뒷바라지 해주신 부모님과 동생을 아끼고 사랑하는 누나와 자형에게 이 논문을 바칩니다.