

박판 딩플 성형을 위한 유한요소해석 및 성형성 평가

허성찬¹· 서영호¹· 구태완²· 송우진³· 김 정²· 강범수[#]

Finite Element Analysis and Formability Evaluation for Dimple Forming with Thin Sheet Metal

Seong-Chan Heo, Young-Ho Seo, Tae-Wan Ku, Woo-Jin Song, Jeong Kim, Beom-Soo Kang
(Received November 1, 2007)

Abstract

Nowadays, Exhaust Gas Recirculation(EGR) Cooler is one of the most favorite systems for reducing the generation amount of NO_x and other particle materials from vehicles burning diesel as fuel. Efficiency of the system is mainly dependent on its heat transfer efficiency and this ability is affected by net heat transferring area of the system. For that reason, several types of heat transfer tube such as dimple, wrinkle and spiral types that have large net area are used. However, it is difficult to manufacture the rectangular tube with dimpled type structure because it experiences too much strain around the rectangular tube surface during the forming process. For that reason, in this study, numerical simulation for forming process of non-symmetric dimple shape on a thin sheet metal was carried out. Furthermore, theoretical forming limit curves(forming limit diagram, forming limit stress diagram) were proposed as criteria of formability evaluation. From the results of finite element simulation in view of stress and strain distribution, it is found that the designed process has robustness and feasibility to safely manufacture the dimpled rectangular tube.

Key Words : Exhaust Gas Recirculation, Dimpled Rectangular Tube, Sheet Metal Forming, FLD, FLSD, FEA

1. 서 론

최근의 고유가 추세에 따라 가솔린 연료를 사용하는 승용 자동차 대신 디젤 연료를 사용하는 자동차의 수요가 증가하고 있다. 이러한 디젤 엔진을 장착한 자동차는 연비와 중량당 출력 지수, 내구성, 신뢰성 및 경제성이라는 장점을 가지고 있으며 엔진 자체에서 발생하는 소음의 저감 기술개발을 통하여 최근에 이르러 승용 자동차에까지 확대 적용되고 있다. 그러나 연소 시 발생하는 질소산화물(NO_x), 탄소산화물(CO, CO₂), 탄화수소(HC)의 배출과 입자상의 매연, 분진(particulate

matter)에 의한 환경적인 문제점을 여전히 가지고 있다[1]. 특히, 최근에는 지구 온난화와 오존층 파괴의 주원인이 되고 있는 자동차 배기 가스에 대한 규제가 엄격해지고 있으며 환경친화적 제품에 대한 소비자들의 수요가 급격히 증가하고 있어 배기 가스 유해물질 저감 기술이 무엇보다도 시급히 해결되어야 될 과제로 대두되고 있다. 이와 같은 맥락에서 유럽 지역에서는 이에 대한 규제(EURO I~V)를 엄격화하고 있다. 이처럼 디젤자동차 엔진의 유해 배기 가스 저감 문제가 시급함에도 불구하고 가솔린 엔진의 유해 배기 가스 저감 기술 개발과 비교하여 볼 때 아직까지 크게 뒤쳐

1. 부산대학교 항공우주공학과 대학원

2. 부산대학교 항공우주공학과

3. 부산대학교 산학협력단

교신저자: 부산대학교 항공우주공학과,

E-mail: bskang@pusan.ac.kr

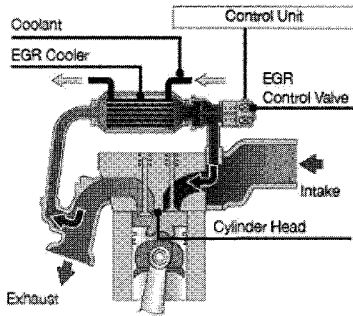


Fig. 1 Schematic view of EGR cooler system

저 있는 실정이다[2~3].

그 중에서도 특히 질소산화물은 가장 심각한 환경오염 요인임과 동시에 배출 문제를 해결하기 어려운 물질이다[4]. 이를 위하여 현재는 일반적으로 Fig. 1과 같이 연소실 배기와 직접 연결되는 배기 가스 재순환 냉각 (EGR Cooler, Exhaust Gas Recirculation Cooler) 시스템이 이용되고 있다[5]. 이 장치는 배기 가스의 온도가 감소함에 따라 질소산화물의 발생량이 감소하는 원리를 이용한 것으로서 엔진의 연소실에서 배기되는 가스를 냉각시키는 방식을 채택하고 있다.

EGR Cooler의 성능은 전열성능에 의존적이기 때문에 열효율을 높이기 위해서는 무엇보다 전열 면적을 크게 하는 것이 최우선이다. 일반적으로 기존의 EGR Cooler에 이용되는 전열 튜브는 판형 (plate), 핀형(pin), 나선형(spiral) 등이 있는데 이들은 가스의 유동에 저항력을 크게 하기 때문에 압력손실이 다소 큰 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 EGR Cooler 시스템 내의 유효 체적 안에서 전열 면적을 증가시키고 사각 튜브관 내의 압력 손실을 최소화하기 위하여, 유선형 형태의 딴플 구조를 가지는 사각 튜브를 전열 튜브로써 제안하고 제품을 개발함에 있어서 수반되어야 할 성형해석과 성형성 평가를 수행하였다. 본 연구에서 이용된 다수의 딴플 구조를 가지는 사각형 튜브는 Fig. 2에서 보듯이 좁은 영역에 다수의 딴플이 조밀하게 분포하고 있고, 국부적으로 연신이 발생하는 형상을 가지고 있으므로 성형 공정 중 딴플 부위가 찢어지는 성형불량이 발생할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 우선 유한 요소해석 기법을 이용하여 딴플 구조를 가지는 박판의 성형 해석을 수행하고, 이로부터 얻어진 결과를 바탕으로 소성불안정조건(plastic instability

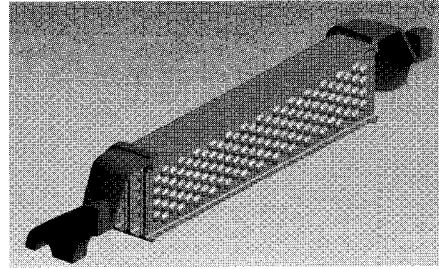


Fig. 2 A quarter configuration of EGR Cooler

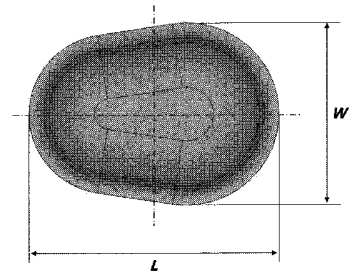


Fig. 3 Schematic view of streamlined dimple shape

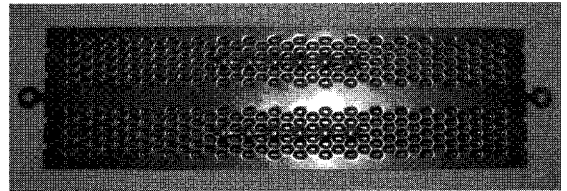


Fig. 4 Prototype of dimpled plate for EGR Cooler

condition)을 기반으로 한 성형한계선도를 이용하여 설계된 EGR Cooler의 딴플 구조를 가지는 열교환기용 사각 튜브의 성형성을 검증하고자 하였다.

2. 다수의 딴플을 가지는 사각 튜브 시제작

본 연구에 다루고자 하는 다수의 딴플 구조를 가지는 박판의 사각 튜브에 있어서 개별 딴플의 형상을 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3에서와 같은 딴플 형상은 SUS304 박판 소재(두께 0.5mm)에 성형되며, 하나의 사각 튜브에는 총 230개의 딴플이 성형된다. 본 연구에서는 비대칭형 딴플 구조를 가지는 전열판을 시제작 하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다. 이렇게 성형된 전열판을 이용하여 중앙부와 양 끝단부의 90° 굽힘 공정에 의해 사각 튜브 형태로 EGR Cooler용 전열 사각 튜브를 제작

하였다. 본 EGR Cooler용 덩플 구조를 가지는 전열판용 사각 튜브의 시제작에 있어서 사용된 소재는 두께 0.5mm의 SUS304 소재이었으며, 총 230개의 덩플이 성형되었다. 또한, 디젤 엔진 내부에서 연소되어 배출되는 배기 가스의 온도가 고온이기 때문에 배출 가스의 EGR Cooler로의 유입에 따른 열변형 등에 의한 각 덩플 튜브간의 접촉을 방지하고, 냉각수의 유로 확보를 위해 총 12개의 돌기를 배치시켰다.

3. 유한요소 모델

본 연구에서의 유한요소해석 대상인 다수의 덩플 구조를 가지는 박판의 사각 튜브에 있어서 Fig. 3에서와 같은 비대칭의 유선형 형상을 가지는 다수의 덩플로 구성된 사각 튜브의 형상을 Fig. 5에와 같이 모델링하였고, 이러한 EGR Cooler 전열판용 사각 튜브의 3차원 모델링 결과를 바탕으로 Fig. 6과 같이 덩플 성형 해석을 위한 유한요소해석 모델을 구성하였다. 본 유한요소 모델링에 있어서도 소재의 두께는 0.5mm로 시제작에 사용된 소재의 두께와 동일하게 하였다. Fig. 6은 덩플형 튜브의 형상과 성형해석을 위해 일부를 선정하여 간소화한 해석모델을 도시하고 있다. 본 유한요소해석을 위한 모델링은 앞서 언급하였던 12개의 중앙부 돌기를 고려하지 않았으며, 이에 따라 총 242개의 덩플을 모델링하였다.

사각 튜브는 직사각형 모양의 판재 양면에 다수의 덩플로 이루어져있고 금형을 이용한 프레스 성형을 통하여 형성된다. 따라서 전열면 전체에서 볼 때 상당한 변형이 발생할 것이라 예상할 수 있으므로 이에 대한 성형성 예측이 반드시 요구된다. 덩플 성형 해석에 소요되는 시간을 줄이기 위하여 한쪽 면의 덩플에 대해서만 고려하였다. 또한 튜브의 폭 방향에 대하여 대칭형상을 가지고 있으므로 성형 시 대칭면을 통한 소재의 유입이 없다고 볼 수 있기 때문에 유한요소 해석에 있어서 전체 모델에 대해 부분 모델을 성형 해석 대상으로 선정하였다. 끝으로 덩플의 배열이 길이 방향으로 반복되므로 덩플 간에 간섭이 발생하는 최소 단위의 모델을 선정하여 Fig. 5와 같이 덩플이 4개인 열과 5개인 열에 대한 유한요소 성형 해석 모델을 고려하였다.

유한요소 해석 모델은 상형과 하형 그리고 두께 0.5mm의 판재로 구성되어 있으며 판재의 소재

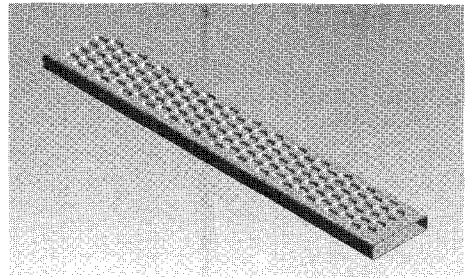


Fig. 5 3-dimensional modeling result of dimpled rectangular tube

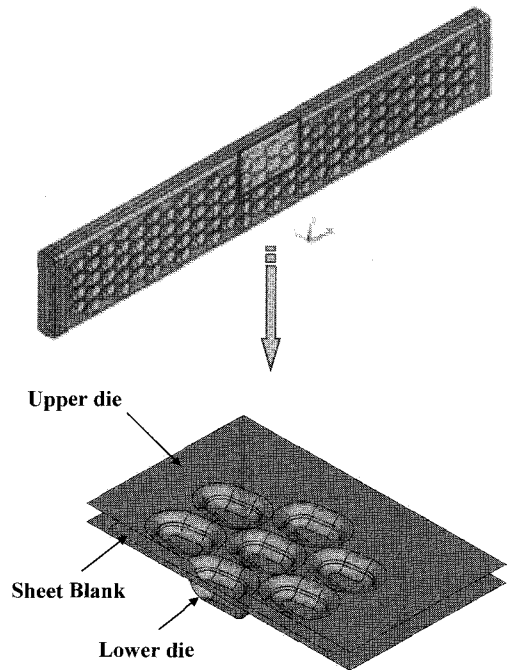


Fig. 6 Simplified analysis model for dimpled tube forming process and modeling of tool sets

는 SUS304이다. 판재의 거동은 인장시험에서 획득한 데이터로부터 $\sigma = 1796.49E^{0.591}$ [MPa] 과 같은 n층 가공경화모델을 이용하였으며, 상·하 금형은 강체로 가정하여 해석을 수행 하였다. 판재는 두께에 비하여 변형량이 크고 덩플의 크기가 매우 작다. 유한요소 해석 모델을 구성함에 있어서 판재는 외연적 3차원 구조해석용 요소(explicit 3-D structural element)인 Solid 164를 사용하였으며, 금형은 얇은 박판 구조해석에 적합한 외연적 요소인(explicit 3-D thin structural element) Shell 163 요소를 각각 사용하였다. 판재의 경우 두께 방향으로 3층(3 layers)의 요소로 모델링하여 두께 방향에 대

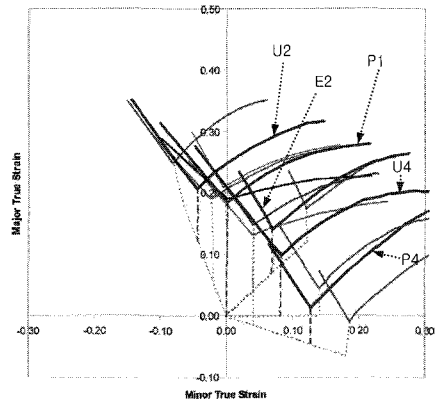
한 변형의 모사가 원활하도록 하였다. 여기서 이용된 판재는 덤플을 성형한 후 판재의 굽힘 공정을 통하여 사각 튜브를 최종적으로 시제작하게 된다. 따라서 일반적인 드로잉(drawing) 공정과는 달리 판재에 경계에서의 소재 유입 없이 오직 연신에 의해서만 성형이 이루어지므로 판재의 경계의 모든 절점의 변위가 없다고 가정하였다. 끝으로 판재와 금형 간의 마찰계수는 0.05로 두었으며 해석은 ANSYS LS-DYNA solver를 이용한 외연적(explicit) 해석을 수행하였다.

4. 성형한계선도

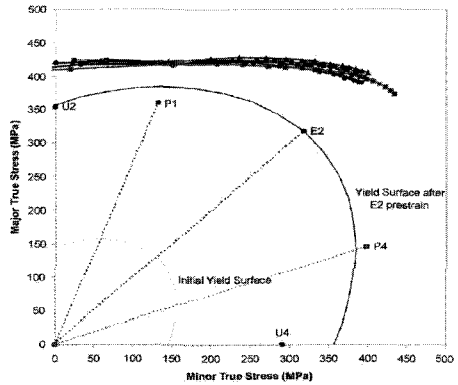
4.1 성형한계 선도의 변형률 경로 의존성

일반적으로 판재의 성형성 평가 기준으로 이용되는 것은 변형률기반성형한계선도(strain based forming limit diagram, FLD)이다. 그러나 변형률 기반 성형한계 선도는 Fig. 7(a)와 같이 변형률 경로에 따라 상이한 형태로 나타나는 특성이 있다. 이는 이미 성형한계에 도달할 수 있는 변형 상태임에도 불구하고 이를 제대로 예측하지 못할 수 있다는 것을 의미한다. 때문에 비선형적인 변형률 경로를 가지는 판재 부품의 성형성 평가 기준으로 삼기에는 다소 미흡한 점이 있다. Fig. 7(a)는 2축 인장(equi-biaxial), 단축인장(uniaxial), 평면변형률(near-plane-strain) 상태의 초기변형률(pre-strain) 경로를 가지는 변형률기반성형한계선도를 도시하고 있다. 여기서와 같이 초기변형률이 어떻게 주어지느냐에 따라 한계 선도의 위치와 모양이 다르게 나타남을 알 수 있다[6].

이와 달리 응력 성분을 기반으로 하는 Fig. 7(b)와 같은 응력기반성형한계선도(forming limit stress diagram, FLSD)는 변형률 경로와 무관하게 거의 하나의 선도로 수렴하는 것(Fig. 7(b)의 상단에 겹쳐진 곡선)을 알 수 있다. 이는 일반적으로 대부분의 변형률 경로가 비선형적인 소성가공 공정에 대한 성형 한계를 예측함에 있어서 응력기반성형한계선도가 더욱 적합한 예측을 할 수 있음을 의미한다[6~7]. 여기서 U2, U4, P1, P4 및 E2는 Fig. 7(a)에서의 각 초기변형률 상태에 대한 응력 상태를 도시한 것이며, E2에 대한 항복곡선을 함께 도시하였다. 여기에 추가적인 변형이 가해지면서 응력상태가 Fig. 7(b)의 상단 선도에 가까워지면 찢어짐이 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 이에 본 연구에서는 변형률과 응력을 기반으로 한 각각의



(a) strain based forming limit diagram - FLD



(b) stress based forming limit diagram - FLSD

Fig. 7 Independency characteristics of forming limit curves on strain path[6]

성형한계 선도를 이용한 성형성 평가를 수행하였다.

4.2 소성불안정이론을 기반으로 한 성형한계선도(forming limit curves)

본 연구에서는 소성불안정이론을 기반으로 한 성형한계선도를 이용하여 성형불량의 발생 가능성을 평가하였다. 주어진 소재는 0.5 mm의 박판으로서 두께방향의 응력성분이 거의 없다고 가정할 수 있고 재료가 수직이방성(normal anisotropy) 거동 특성을 보인다고 가정하였다. 또한 식 (1)과 같은 Hill의 2차형 항복함수로부터 도출된 성형한계 선도를 이용하였다[7~8].

$$2f(\sigma_y) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (1)$$

판재에서의 응력은 성형시 주응력 비 $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$ 와 주변형률의 비 $\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$ 가 일정하게 유지된다고 가정하였다. 본 연구에서는 다음의 두 가지 소성불안정조건을 이용하였다. 먼저 Hill이 제안한 판재의 국부네킹(local necking) 조건[9]에 대한 소성불안정조건식은 식 (2)와 같으며 Swift의 확산네킹(diffuse necking)에 대한 소성불안정조건식은 식 (3)과 같다.

$$\frac{1}{Z_L} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} \leq \frac{(1+\alpha)(2-\rho)}{2(1-\alpha\rho+\alpha^2)^{1/2}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{Z_D} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} \leq \frac{\alpha(2\alpha-\rho)^2 + (2-\alpha\rho)^2}{4(1-\alpha\rho+\alpha^2)^{3/2}} \quad (3)$$

소성불안정조건을 이용한 성형한계선도를 얻기 위해서는 네킹이 발생하는 순간의 주축 방향에 대한 임계 변형률(critical strain) $\varepsilon_1^c, \varepsilon_2^c$ 이 필요하다. 이는 앞서 유도하였던 소성불안정조건식을 이용하여 얻을 수가 있다. 그리고 판재를 n 승경화 강소성체($\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n$)로 가정하면 소성불안정조건에 의해 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{Z_i} = \frac{1}{\bar{\sigma}} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} = \frac{n}{\bar{\varepsilon}} = \frac{\Psi_i}{\Omega_i} \quad (i=L, D) \quad (4)$$

이 때 Ψ_i, Ω_i 는 주응력비 α 의 함수로서 표현되고 α 는 β 의 함수 $\alpha(\beta)$ 로 정의가 가능하다. 또한 비례하중을 가정하면 소성영역에 대한 구성식으로부터 유효변형률 $\bar{\varepsilon}$ 는 식 (5)와 같이 주변형률과 판재의 이방성계수 R (본 연구에서의 $R=1$)로 표현된다. 그러면 식 (4), (5)를 이용하여서 임계 성형한계 변형률 및 응력성분을 식 (6), (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \frac{2R}{R+1} \varepsilon_1 \varepsilon_2} = \Theta \varepsilon_1 \quad (5)$$

여기서 $\Theta = \frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \sqrt{1+\beta\rho+\beta^2}$ 이다.

$$\varepsilon_1^c = \frac{\Omega_i n}{\Theta \Psi_i}, \quad \varepsilon_2^c = \beta \varepsilon_1^c \quad (6)$$

$$\sigma_1^c = \frac{(1+R)^2 \bar{\sigma}}{1+2R} \left[\varepsilon_1^c + \frac{R}{1+R} \varepsilon_2^c \right] \quad (7)$$

$$\sigma_2^c = \frac{(1+R)^2 \bar{\sigma}}{1+2R} \left[\varepsilon_2^c + \frac{R}{1+R} \varepsilon_1^c \right]$$

아울러 인장시험에서 획득한 소성강도계수와 가공경화지수를 대입하여 변형률 비 β 에 대하여 정리하면 성형한계선도(forming limit curves)를 획득할 수 있다[10].

5. 덩플 성형 해석 결과

Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 각각 유효변형률 및 유효응력 분포를 도시한 것이다. Fig. 8와 같이 변형률과 응력이 덩플의 모서리에 집중됨을 알 수 있다. 특히, 유선형 모양의 덩플에서도 폭이 좁은 부위에 집중되고 있으며 따라서 이 부위에서 찢어짐이 발생할 가능성을 예상할 수 있다.

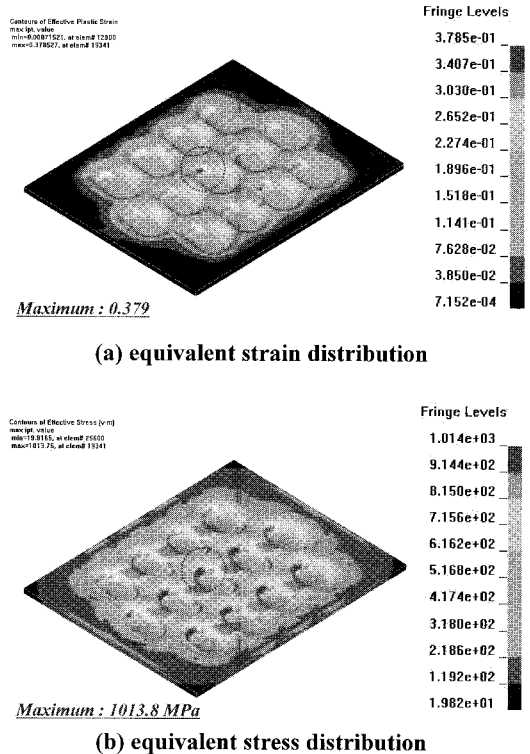


Fig. 8 Simulation results of dimple forming process

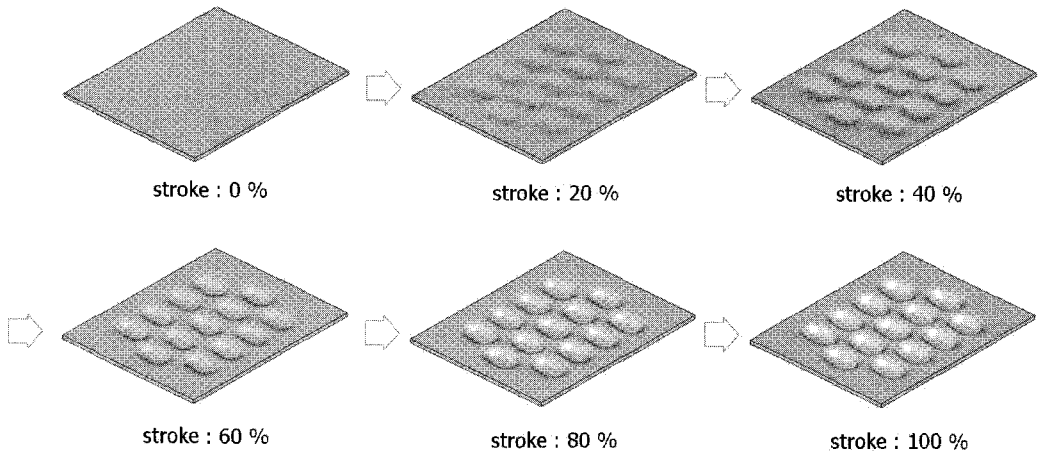
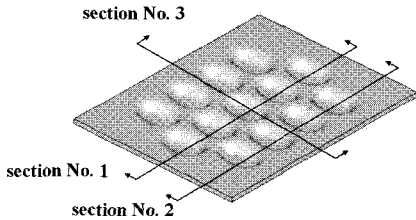
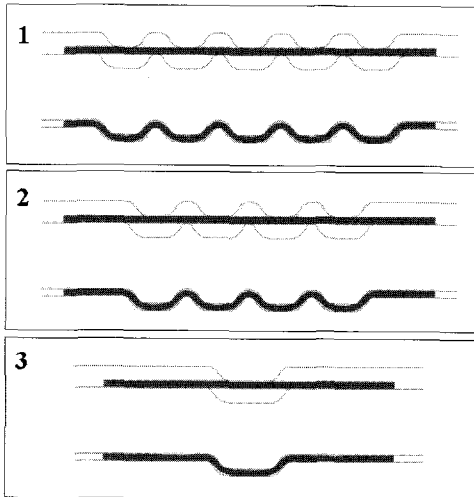


Fig. 9 Deformed configuration of dimple forming process at each stroke



(a) sections for investigation of material filling



(b) section views for selected cutting surface

Fig.10 Investigation of filling of material between dies by cutting several sections

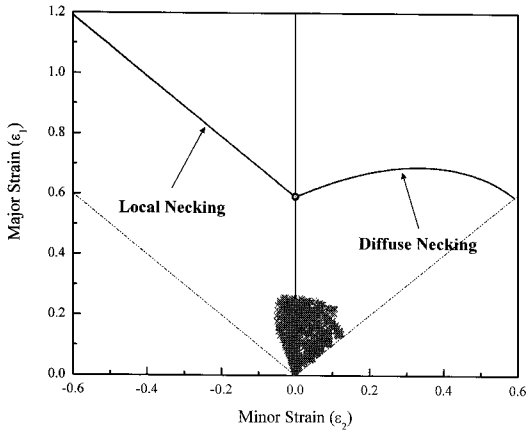
또한, Fig. 9에서는 뒨플 성형을 위한 유한요소 해석 과정을 각 단계별로 보여주고 있다. 유한요

소 해석에는 ANSYS LS-DYNA를 사용하였고, 이때 블랭크에 사용된 요소의 개수는 약 38,400개이다. 펀치 스피드는 성형 과정에 있어서 dynamic effect를 줄이기 위한 방법으로 성형 해석상 mass는 그대로 두고 time scaling(해석에 있어서 time scaling을 1로 가정)만을 이용하여 펀치 스피드를 설정하였으며, 이에 따른 kinetic 에너지가 internal 에너지에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작음을 LS-prepost를 이용한 후처리 과정에서 확인할 수 있었다.

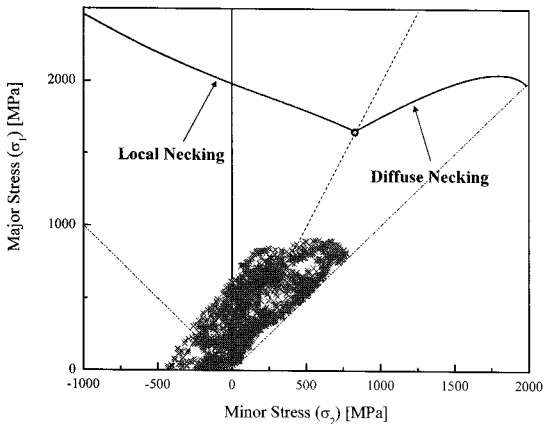
아울러 소재가 상형과 하형 사이의 공간에 빈틈이 없이 잘 채워졌는지 알아보기 위하여 Fig. 10(a)와 같이 주요 성형 부위에 대하여 세 방향의 단면을 조사하였다. Fig. 10(b)에서 보여주듯이 곡률 반경이 작은 모서리 부위에서는 다소 채워지지 않은 부분이 있지만 대부분의 영역에서 소재가 채워지면서 뒨플이 잘 형성되었음을 확인할 수 있다.

6. 성형성 평가 기준 적용

앞 절에서 언급한 뒨플 형상에 대한 유한요소 성형 해석 결과로부터 뒨플형 튜브는 대체로 성형 불량 없이 성형이 가능할 것으로 예상되었다. 그러나 뒨플의 모서리에서 발생하는 국부적 변형은 성형 공정에서만 뿐만 아니라 과도한 두께 감소로 이어져 열교환기에 탑재하였을 경우 내·외부 유동의 압력에 의하여 터져버릴 가능성도 있다. 따라서 소성변형이론을 기반으로 성형성 평가 기준 적용을 통한 검증이 필요하다.



(a) application of forming limit diagram



(b) application of forming limit stress diagram

Fig.11 Evaluation of formability for dimple forming process using forming limit curves based on the plastic instability condition

이에 본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 성형해석 결과를 소성불안정이론을 기반으로 도출한 성형한계선도에 적용하여 성형 불량 발생 가능성을 예측하였다. Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)는 변형률기반성형한계선도와 응력기반성형한계선도에 주변형률 성분과 주응력 성분을 각각 도시한 것이다. 여기 도시된 바와 같이 성형한계선도는 일반적으로 음의 주변형률(minor strain) 영역에 대해서는 국부네킹조건이, 양의 주변형률 영역에 대해서는 확산네킹조건이 적용된다. 또한 성형한계선도가 의미하는 바는 도시된 변형률 및 응력 데이

터가 성형한계선도 아래에 존재할 경우 주어진 성형 조건에서 판재에 찢어짐이 발생하지 않음을 의미한다. 도시된 Fig. 11의 성형한계선도 적용 결과에서 확인할 수 있듯이 모든 주변형률 및 주응력 성분이 각 성형한계선도의 아래에 분포하고 있다.

따라서 딤플 튜브는 주어진 조건에서 성형불량 없이 원활하게 생산이 가능할 것으로 판단되며 성형한계 선도에 대한 여유도 큰 폭의 여유를 가지고 있으므로 과도한 두께 감소의 발생도 없으리라 예상할 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 배기 가스 재순환 장치인 EGR Cooler용 딤플 구조를 가지는 사각형 열교환 튜브의 성형 공정을 해석하고 그 결과를 이용한 성형성 평가를 수행하였다. 성형성 평가 기준으로는 소성불안정조건을 기반으로 한 성형한계선도를 이용하였으며 변형률 경로에 관한 의존성을 보완하기 위하여 변형률기반성형한계선도와 응력기반성형한계선도를 함께 이용하였다. 이를 통하여 본 연구에 적용된 비대칭 유선형 형상의 딤플 구조를 가지는 직사각 튜브는 성형 부위의 대부분의 영역에서 고르게 성형이 될 수 있음을 확인하였고, 과도한 두께감소나 성형 불량에 의한 터짐의 위험 없이 안정하게 성형될 수 있음을 확인하였다. 아울러 본 연구에서 적용된 판재의 성형 해석과 성형한계선도를 이용한 성형성 평가 과정은 다른 판재 성형 제품에도 폭넓게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2007년도 과학기술부의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. M60601010004-06E0101-00400)입니다. 또한 본 연구는 2 단계 BK21 사업, 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15-2006-022-02002-0)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] R. S. Benson, N. D. Whitehouse, 1979, Internal

- combustion engines, Oxford, Pergamon Press.
- [2] A. Dubreuil, F. Foucher, 2007, HCCI combustion: effect of NO in EGR, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 2879~2886.
- [3] C. A. Idcheria, L. M. Pickett, 2007, Effect of EGR on diesel premixed-burn equivalence ratio, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 2931~2938.
- [4] J. B. Heywood, 1988, Internal combustion engine fundamentals, New York, McGraw-Hill.
- [5] D. Tomazic, A. Pfeifer, 2002, Cooled EGR-a must or an option for 2002/04., Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers Inc., [SAE paper no. 2002-01-0962].
- [6] T. B. Stoughton, X. Zhu, 2004, Review of theoretical models of the strain-based FLD and their relevance to the stress-based FLD, International Journal of Plasticity, Vol. 20, pp. 1463~1486.
- [7] 김상우, 김정, 이정환, 강범수, 2005, 유한요소법과 FLSD를 이용한 관재하이드로포밍 공정에서의 성형 한계 예측, 한국소성가공학회지, 제14권 제6호, pp. 527~532.
- [8] 김상우, 김정, 박훈재, 강범수, 2004, 네킹발생 조건에 의한 관재 액압성형공정에서의 더짐 불량 예측, 한국소성가공학회지, 제13권 제7호, pp. 629~634.
- [9] R. Hill, 1983, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, New York.
- [10] 허성찬, 송우진, 구태완, 김정, 강범수, 2007, 하이드로포밍 부품의 성형성 평가기준 적용 연구, 대한기계학회논문집 A권, 제31권 제 8 호, pp. 833~838.