

성형해석 및 실험을 통한 딴플 튜브의 성형성 평가

Evaluation on Formability of Dimple Tube using Numerical Simulation and Experiment

*허성찬¹, 이현민¹, 변영섭¹, 송준범¹, 김 정², 강범수²
 *S. C. Heo¹, H. M. Lee¹, Y. S. Byun¹, J. B. Song¹, J. Kim², #B. S. Kang² (bskang@pusan.ac.kr)
¹ 부산대학교 항공우주공학과 대학원, ² 부산대학교 항공우주공학과

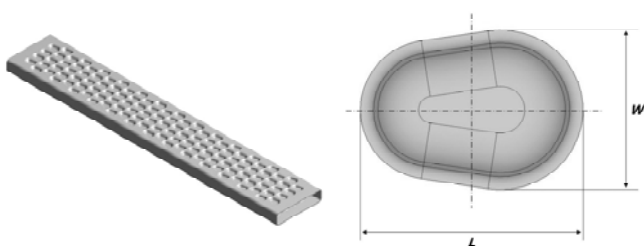
Key words : EGR cooler, Dimple tube, Formability evaluation

1. 서론

최근의 고유가 추세에 따라 가솔린 연료를 사용하는 승용 자동차 대신 디젤 연료를 사용하는 자동차의 수요가 증가하고 있다. 그러나 디젤 엔진은 연소 시 발생하는 질소산화물(NO_x), 산화탄소물(CO, CO₂), 탄화수소(HC) 등을 발생시키고 입자상의 매연, 분진(Particulate Matter)에 의한 환경적인 문제점을 여전히 가지고 있다⁽¹⁾. 특히 이중에서도 질소산화물은 환경오염의 주요인임에도 불구하고 디젤 엔진에서 배출되는 것 자체가 불가피한 물질이다⁽²⁾. 이와 같은 환경 문제 요인을 해결하기 위한 후처리 장치로서 EGR (Exhaust Gas Recirculation) Cooler 시스템이 일반적으로 이용되고 있다⁽³⁾. 오염물질 배출량의 저감은 EGR Cooler의 열교환 성능에 결정되기 때문에 제한된 체적 내에서 열교환 면적을 최대한으로 확보하는 것이 중요하다. 기존의 제품에는 관형, 나선형 등의 열교환 튜브가 이용되고 있으나 이들은 압력손실이 다소 크게 발생하여 효율이 낮은 문제점을 안고 있다. 이에 본 연구에서는 가스 유동의 저항을 줄이기 위하여 Fig. 1에 도시한 바와 같이 유선형 딴플을 다수 배치한 형태의 열교환 튜브를 제안하였다. 본 모델의 경우 튜브의 표면에서 비교적 많은 변형이 발생하고 국부적인 두께 감소가 발생할 가능성이 크므로 이에 대한 성형성 평가가 요구된다. 이에 본 연구에서는 성형해석 결과와 시제품에서의 두께 분포를 비교하였다. 아울러 소성불안정 이론을 기반으로 한 성형한계선도를 적용하여 성형성 평가를 하였다.

2. 딴플 튜브의 성형공정 해석

본 연구의 딴플 튜브는 길이 방향으로 대칭이며 동일한 형태의 딴플 배열이 반복되는 형태를 가지고 있다. 따라서 해석의 효율 증대를 위하여 성형해석 모델을 단순화 할 수 있다. 그러나 해석 모델의 단순화 과정에서 인접한 딴플의 변형에 의한 간섭 효과를 고려해야 한다. 이에 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 중앙부에 인접한 딴플에 의하여 둘러싸인 부분모델을 최종적으로 선정하였다. 해석모델은 상형과 하형으로 구성된 다이와 0.5mm 두께의 SUS 304 관재 모델로 구성된다. 소재의 거동은 탄소성재료로 가정하였으며 이에 대한 물성 계수들은 소성강도계수 K와 가공경화지수 n은 각각 1796.49[MPa], 0.591로 두었으며 이 값들은 인장시험을 통하여 획득하였다. 소재의 유한요소해석 모델은 두께 방향에 대한 변형의 모사가 원활하도록 3개의 층으로 요소를 구성하였다. 다이 모델은 모두 강체로 가정하였으며 소재와의 마찰 계수는 0.05로 두었다. 성형해석에



(a) dimple type heat transfer tube (b) configuration of dimple
 Fig. 1 Schematic view of dimple tube and dimple on tube surface

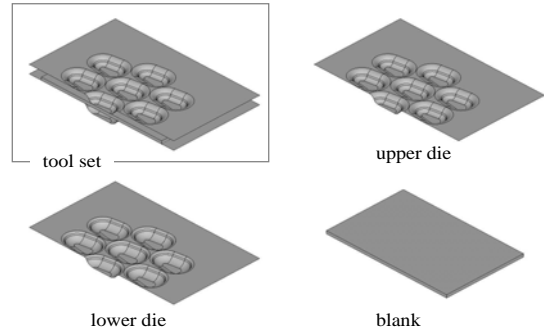


Fig. 2 Tool sets of metal forming simulation for dimple type tube

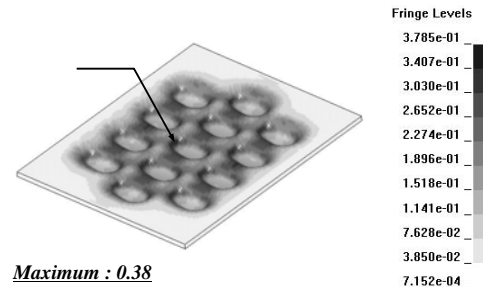


Fig. 3 Simulation results of dimple tube forming process

는 외연적 기법 기반의 ANSYS LS-DYNA가 이용되었다. 본 연구에 적용된 성형 공정에서는 먼저 관재에 다수의 딴플을 생성시킨 후 굽힘(bending) 공정을 통하여 튜브로 제작된다. 좁은 간격으로 배치된 딴플 배열의 성형 공정은 드로잉 공정에서와 같은 플랜지 부위로부터의 소재 유입이 거의 없기 때문에 딴플의 형성에는 인장 변형이 지배적이다. 따라서 딴플의 모서리와 같이 곡률 반경이 작은 부위에 국부적으로 변형이 집중될 수 있다. Fig. 3은 딴플 성형 후 변형을 분포를 도시하고 있으며 결과로부터 최대 변형률은 약 0.38로 딴플의 작은 모서리 부위에 집중되고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 부위에 대한 두께 변화를 시제품과 비교하여 조사하였다.

3. 딴플 튜브의 시제품 제작 및 형상 비교

해석결과에 대한 검증과 성형성을 조사하기 위하여 딴플 튜브를 제작하였다. Fig. 4는 이에 대한 결과를 도시하고 있으며 해석 결과와의 비교를 위하여 3D X-ray 촬영 장비를 활용하여 두께 분포를 측정하였다. 예측된 바와 같이 딴플의 모서리에서 국부적인 두께의 감소가 발생됨을 확인하였으며 최대 감소율은 약 19.4%로 딴플의 왼쪽 부위에서 나

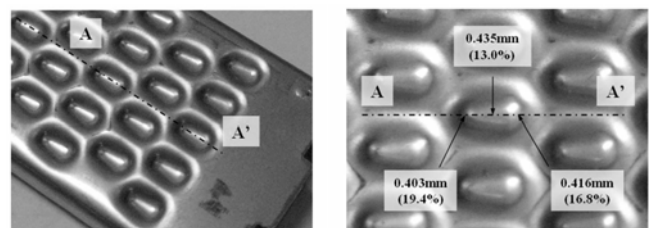


Fig. 4 Simulation results of dimple tube forming process

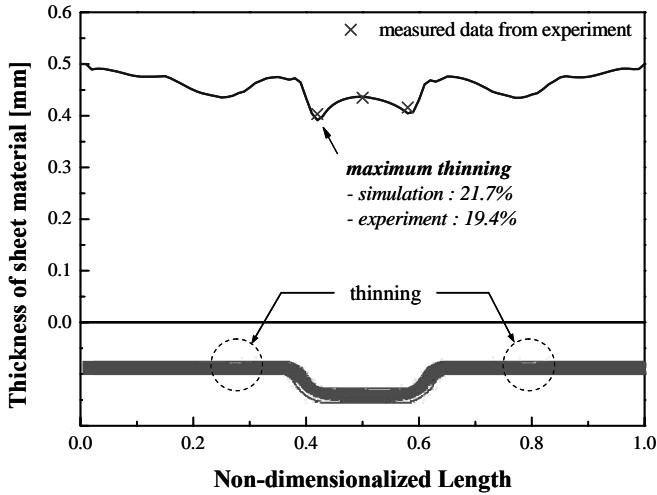


Fig. 5 Investigation on thickness distribution in section A-A' for validation of simulation results with regard to experiment

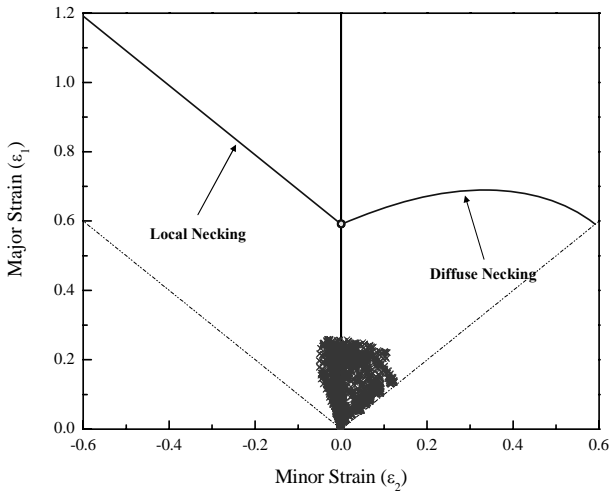


Fig. 6 Evaluation of formability using forming limit diagram based on plastic instability conditions

타났다. Fig. 5는 단면 A-A'에 대하여 해석 결과에서 조사한 두께 분포와 시제품에서 측정된 두께를 함께 도시한 것이다. 실험과 유사하게 해석에서는 약 21.7%의 최대 변형률이 왼쪽 딥플 모서리에서 관찰되었으며 딥플에 대한 두께 분포 경향이 잘 일치함을 확인하였다. 아울러 실험에 비하여 해석 결과의 두께 감소율이 조금 더 높게 예상되었으므로 해석 결과를 이용한 성형성 평가 결과에 대하여 신뢰할 수 있다고 볼 수 있다. 또한 점선으로 표기한 부위에서 약간의 두께 감소가 발생되었는데 이는 딥플의 폭 넓은 부위에서 발생한 변형으로 인하여 약간의 소재 유입이 발생하였음을 의미한다.

4. 소성불안정 이론을 이용한 성형성 평가

국부적인 변형은 과도한 두께감소로 이어져 고온 고압의 운용 환경 중에서 파단이 발생할 위험이 있다. 따라서 실험을 통하여 검증된 해석 결과를 이용하여 성형한계선도에 적용하여 검증할 필요성이 있다. 본 연구에서는 소성불안정이론을 기반으로 한 성형한계선도를 적용하여 성형불량의 발생 가능성을 평가하였다. 여기서 재료가 수직이방성(normal anisotropy) 거동 특성을 보인다고 가정하고 소성불안정조건과 Hill의 2 차형 항복함수를 이용하여 식 (1), (2)에 해당하는 성형한계선도를 이용하였다⁽⁴⁻⁶⁾.

$$\epsilon_1^c = \frac{\Omega_i n}{\Theta \Psi_i}, \quad \epsilon_2^c = \beta \epsilon_1^c \quad (1)$$

$$\sigma_1^c = \frac{(1+R)^2}{1+2R} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \left[\epsilon_1^c + \frac{R}{1+R} \epsilon_2^c \right], \quad \sigma_2^c = \frac{(1+R)^2}{1+2R} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \left[\epsilon_2^c + \frac{R}{1+R} \epsilon_1^c \right] \quad (2)$$

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

성형한계선도는 일반적으로 음의 부변형률(minor strain) 영역에 대해서는 국부네킹(local necking)이, 양의 부변형률 영역에 대해서는 확산네킹(diffuse necking)이 적용된다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 제품의 변형률 분포가 성형한계선도에 비하여 안전한 아래 영역에 집중되어 있으며 네킹에 대하여 많은 여유를 가지고 있음을 확인하였다. 따라서 딥플 튜브는 네킹에 대한 우려 없이 안전한 제품으로 생산이 가능할 것으로 예상되었다.

5. 결론

본 연구에서는 EGR Cooler 용 딥플 튜브의 성형공정 해석과 실험을 통하여 해석 결과에 대한 검증을 수행하였다. 이로부터 해석 결과의 적합성을 확인하였다. 이에 더하여 소성불안정조건을 기반으로 한 성형한계선도를 적용한 성형성 평가를 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 다른 딥플 튜브의 성형 안정성을 확인하였다. 결론적으로 본 연구에 적용된 튜브는 전체적으로 딥플이 잘 형성됨을 확인하였고 과도한 두께감소나 성형불량 없이 안정함을 보였다. 아울러 본 연구에서 적용된 성형성 평가 과정은 일반적으로 두께 방향의 응력을 무시할 수 있는 판재 성형 공정에 대하여 활용될 수 있을 것이다.

후기

이 논문은 2008년도 교육과학기술부의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. R0A-2008-000-20017-0). 또한, 교육과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(No. R15-2006-022-0200 2-0)의 부분적 지원에 의하여 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. R.S. Benson, N.D. Whitehouse., "Internal combustion engines", Oxford, Pergamon Press, 1979.
2. J.B. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals", New York, McGraw-Hill, 1988.
3. D. Tomazic, A. Pfeifer, "Cooled EGR-a must or an option for 2002/04". Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers Inc., 2002.
4. S.W. Kim, J. Kim, H.J. Park and B.S. Kang, 2004, "A Prediction of Bursting in Tube Hydroforming Process Based on Necking Criteria", Transactions of Materials Processing, vol. 13. No. 7, pp.629-634.
5. S.W. Kim, J. Kim, J.H. Lee and B.S. Kang, 2005, "Forming Limit Prediction in Tube Hydroforming Processes by Using the FEM and FLSD", Transactions of Materials Processing, vol 14. No. 6, pp.527-532.
6. R. Hill, 1983, "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford University Press, New York.