

유한요소해석에 의한 자동차용 관재액압성형 부품의 성형성 평가

송우진¹ · 허성찬² · 구태완³ · 김 정³ · 강범수[#]

Evaluation of Formability on Hydroformed Part for Automobile Based on Finite Element Analysis

Woo-Jin Song, Seong-Chan Heo, Tae-Wan Ku, Jeong Kim, Beom-Soo Kang

(Received November 14, 2007)

Abstract

Tube hydroforming process is generally consisted with pre-bending, preforming and hydroforming processes. Among forming defects which may occur in tube hydroforming such as buckling, wrinkling and bursting, the wrinkling and bursting by local instability under excessive tensile stress mode were mainly caused by thinning phenomenon in the manufacturing process. Thus the accurate prediction and suitable evaluation of the thinning phenomenon play an important role in designing and producing the successfully hydroformed parts without any failures. In this work, the formability on hydroformed part for automobile, i.e. engine cradle, was evaluated using finite element analysis. The initial tube radius, loading path with axial feeding force and internal pressure, and preformed configuration after preforming process were considered as the dominant process parameters in total tube hydroforming process. The effects on these process parameters could be confirmed through the numerical experiments with respect to several kinds of finite element simulation conditions. The degree of enhancement on formability with each process parameters such as initial tube radius, loading path and preform configuration were also compared. Therefore, it is noted that the evaluation approach of the formability on hydroformed parts for lots of industrial fields proposed in this study will provide one of feasible methods to satisfy the increasing practical demands for the improvement of the formability in tube hydroforming processes.

Key Words : Tube Hydroforming, Initial Tube Radius, Loading Path, Preform, Formability, Thickness Reduction Rate

1. 서 론

최근 액압성형기술은 부품의 경량화와 성형 제품의 구조강도 개선 및 품질 정도 향상 등의 장점으로 자동차 및 항공기 등의 산업분야에서 기존 성형공정을 대체함과 더불어 기존 공정의 간소화 및 제반 부품의 일체화를 구현하고 있다. 관

재 액압성형공정(tube hydroforming process)의 경우에 있어서는 관재 두께의 과도한 감소를 방지하기 위하여 양 끝단부에 관재의 길이 방향으로의 압축력(axial feeding force)과 관재 내부압력(internal pressure)을 동시에 작용하여 초기 관재를 성형하게 된다. 따라서, 이와 같은 성형 과정 중에는 좌굴(buckling), 주름(wrinkling) 및 터짐(bursting) 등의

1. 부산대학교 산학협력단
2. 부산대학교 항공우주공학과 대학원
3. 부산대학교 항공우주공학과
교신저자: 부산대학교 항공우주공학과,
E-mail: bskang@pusan.ac.kr

성형불량이 발생할 수 있다[1]. 좌굴은 성형 초기에 낮은 내부압력 상태에서 관재의 길이 방향으로의 소재 유입이 과도할 경우에 발생하는 경향이 있으며, 주름 현상은 관재 길이 방향으로의 압축력이 과도한 상태에서 관재 직경의 과도한 확장(bulging)으로 인한 소재 두께가 감소하는 부분에서 주로 발생한다. 그리고, 터짐 현상은 가해지는 관재 길이 방향으로의 압축력에 비해 내부압력이 과도한 상태에서 관재의 두께가 얇아지면서 발생하게 된다. 이와 같은 주름이나 터짐 현상의 발생은 관재 액압성형공정 중 발생하는 초기 관재의 두께 감소율이 주된 발생요인으로 작용함을 알 수 있다. 특히, 터짐 현상은 상대적으로 낮은 관재 길이 방향의 압축력과 높은 내부압력으로 인한 과도한 인장력 하에서 국부적인 소성불안정 현상인 네킹(necking)의 결과로 일어나므로 이를 근간으로 하는 이론적 연구가 활발히 진행되고 있으며[2~7], 성형공정 설계 관련자와 공정 기술자들에게 성형제품 불량을 막기 위한 유용한 가이드라인을 제공하고 있다.

그러나, 이러한 이론적인 현상을 기반으로 하는 성형불량 예측 및 평가에 관한 연구에 비해 보다 더 보편적으로 활용되는 유한요소법(finite element method)을 기반으로 하는 상용 해석프로그램을 이용한 성형공정에서의 관재 두께 감소율로 인해 발생 가능한 성형불량을 예측하는 연구가 상대적으로 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 실제 승용차량용 엔진 크레들(engine cradle)에 적용되는 관재 성형품의 액압성형공정에 대한 유한요소해석을 통하여 전체 성형공정의 성형성을 평가하고자 하였으며, 아울러 주요 공정설계변수에 대하여 수치해석적 실험을 수행하여 성형성 향상 방안을 제시하고자 하였다.

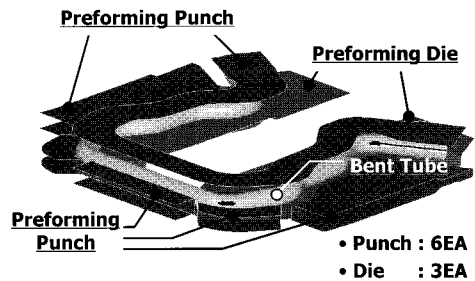
2. 유한요소해석

본 연구에서는 승용차량용 엔진 크레들 성형공정의 성형성에 대한 주요 공정변수들의 영향을 분석하기 위하여 외연적 수치해석기법(explicit finite element method)을 사용하는 LS-Dyna V970을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 1에 성형성 평가를 위한 전체 공정 중 예비성형공정과 이후의 관재 액압성형공정의 소재와 금형 위치도를 각각 나타내었다. 원활한 관재 액압성형공정을 위한 예비성형공정은 Fig. 1 (a)에서와 같이 9개의 금

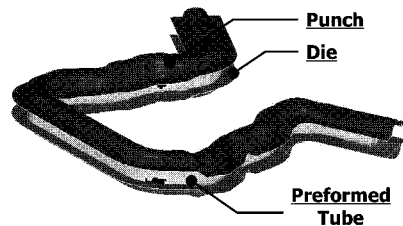
형으로 성형이 이루어진다. 그리고, 전체 성형공정에 사용된 초기 관재의 재료 특성을 Table 1에 나타내었다. 전체 성형공정에서 초기 관재의 직경에 따른 성형성 분석을 위하여 Table 1에서와 같이 4가지의 서로 다른 초기 관재 직경에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 성형성 평가를 위한 유한요소모델 중 초기 관재 유효응력-변형률 관계식에서의 강도 계수와 가공경화 지수는 Table 1에서와 같이 630.77MPa과 0.168이 적용되었다. 이는 초기 관재 재료의 단순인장 시험결과에서 얻어진 값들이다. 본 연구에서는 금형과 초기소재 사이의 마찰계수는 0.1로 고정하여, 동일한 금형 표면상태 및 동종소재를 사용하는 관재액압성형에서의 초기관재 직경, 성형하중경로 및 예비성형 형상에 대한 성형성 영향도를 분석하였다.

Table 1 Tube material properties

Parameter	Value
Initial tube diameter [mm]	73, 74, 75, 76
Initial tube thickness [mm]	2.7
Strength coefficient (K) [MPa]	630.77
Work hardening coefficient (n)	0.168
Coefficient of friction	0.1



(a) Preforming process



(b) hydroforming process

Fig. 1 Die layout for total manufacturing process

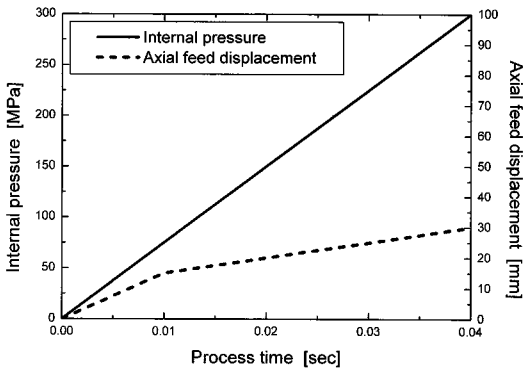


Fig. 2 Loading condition on tube hydroforming process

전체 성형과정 중 관재 액압성형공정의 하중조건은 Fig. 2에 도시된 바와 같으며, 관재 길이 방향의 압축력과 내부압력을 유한요소해석에 적용하였다. 그리고 Fig. 2의 하중조건과 더불어 전체 성형공정의 하중 경로에 따른 성형성 분석을 위하여 4절의 Fig. 5에서와 같이 3가지 다른 하중경로를 유한요소해석에 고려하였다.

3. 초기 관재 직경에 따른 성형성 분석

엔진 크레들의 전체 성형과정 중 예비성형공정에 사용되는 초기 관재의 직경에 따른 성형성 분석을 위하여, 본 절에서는 초기 굽힘공정 이전의 동일한 초기 관재 두께(2.7mm)를 가지는 4가지 경우의 초기 관재 직경에 대하여 초기 관재 굽힘공정에서의 굽힘형상에 대한 굽힘부 내측 및 외측부의 두께분포를 관재 굽힘형상에 대한 해석적인 방법을 통하여 구하고, 구해진 두께 분포값들을 예비성형공정 유한요소모델의 각 절점별 초기값을 고려하여 유한요소해석을 수행하였다. 초기 관재 직경에 따른 성형성 분석을 위한 유한요소해석에는 Fig. 2에서 도시된 하중조건이 적용되었다.

예비성형공정 및 최종 관재 액압성형공정이 완료된 시점에서의 최소 두께와 최대 두께 감소율을 Table 2과 Table 3에 각각 정리하였다. 그리고, Fig. 3은 예비성형공정이 완료된 상태에 있어서 서로 다른 4가지의 직경에 대한 단면 형상 비교를 위해 선정된 5군데의 측정 위치를 나타내고 있다. Fig. 3에서 제시된 단면형상 측정위치에서의 비교 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 (a)에서는 예비성형공정이 완료되었을 때의 각각의 측정 위치에

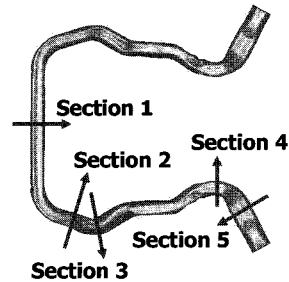


Fig. 3 Considered positions for comparison of cross-sectional configuration

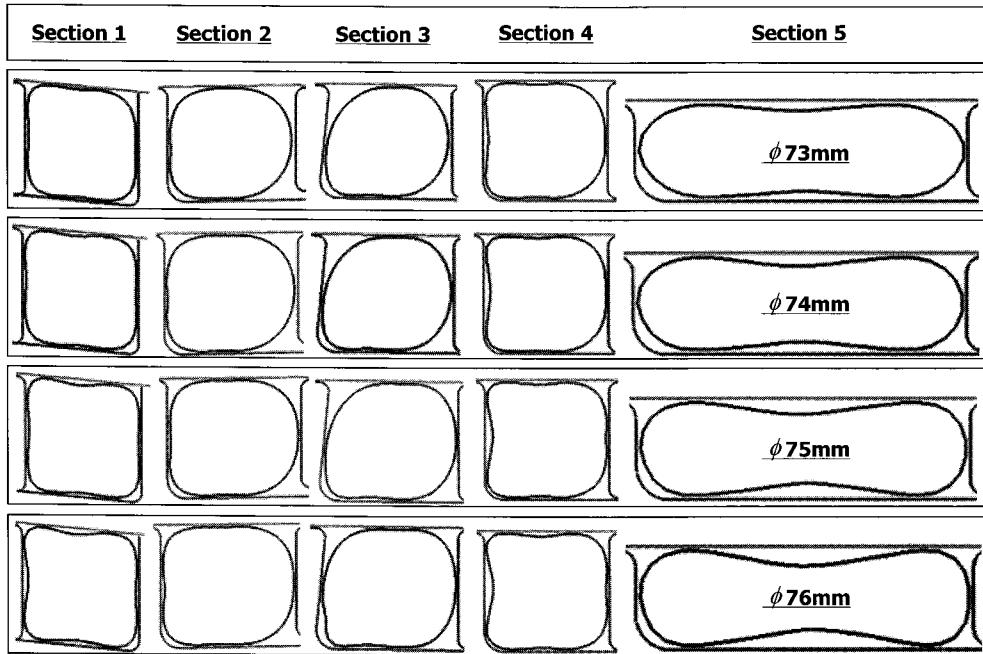
Table 2 Comparison of analysis results after preforming process

Initial tube Thickness	Min. Value of Thickness	Max. Value of Thickness reduction rate
73mm	2.498mm	7.48%
74mm	2.497mm	7.52%
75mm	2.497mm	7.52%
76mm	2.364mm	12.44%

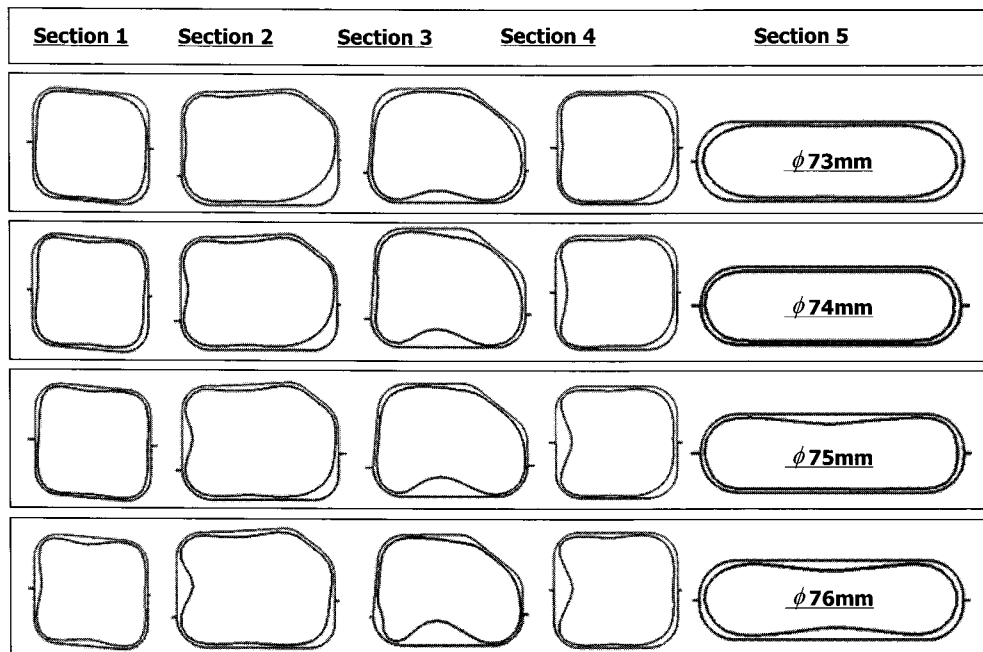
Table 3 Comparison of analysis results after hydroforming process

Initial tube Thickness	Min. Value of Thickness	Max. Value of Thickness reduction rate
73mm	1.949mm	27.81%
74mm	2.048mm	24.15%
75mm	2.182mm	19.19%
76mm	2.277mm	15.67%

서의 예비성형 금형과 성형된 제품의 단면 변화를 나타내었으며, Fig. 4 (b)에서는 예비성형공정이 완료된 형상에 대하여 관재 액압성형을 위한 상·하 금형이 닫히고 내부압력이 가해지기 직전 성형된 형상의 5군데 측정 위치에서의 액압성형 금형과 성형된 제품의 단면 변화를 나타내었다. 본 절에서 성형성 분석 대상이 되는 초기 관재 직경에 따른 유한요소해석 결과를 살펴보면, 예비성형 공정 결과의 두께 감소율과 최종 관재 액압성형

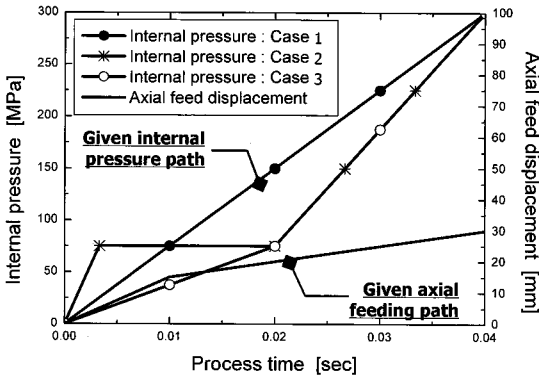


(a) After performing process

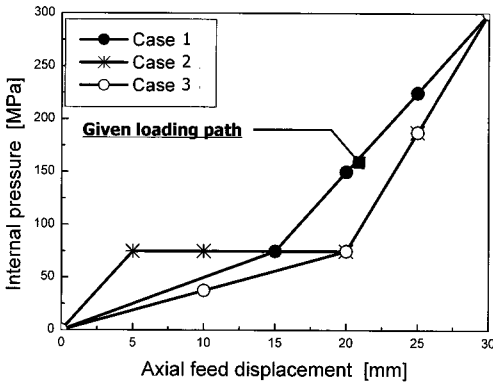


(b) After closing dies in hydroforming process

Fig. 4 Comparison of cross-sectional configuration in tubular material



(a) Process time Vs. Loading path



(b) Internal pressure Vs. Axial feed

Fig. 5 Corresponding loading path in hydroforming process

공정 이후의 두께 감소율은 서로 상반되는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

Table 2 및 3에서와 같이, 예비성형공정에서의 초기 관재 직경이 커짐에 따른 두께 감소율 증가 현상은, 작은 직경의 초기 관재 초기급형공정에서 낮은 길이방향의 스트레칭 현상의 예비성형공정에서의 두께 감소율 완화 현상 및 과도하게 큰 초기 관재 직경이 예비성형 금형내에서 추가적인 원주방향 변형을 수반함을 예측할 수 있다. 이와 반대로, 최종 관재 액압성형공정에서의 초기 관재 직경이 커짐에 따른 두께 감소율 감소 현상은, Fig. 4 (b)에서 확인할 수 있듯이, 초기 관재의 직경이 커짐에 따라 액압성형용 금형 벽면에 성형된 관재를 보다 더 가까이 위치시킴으로써 직경방향의 작은 관재 팽창량의 영향 및 원주방향의 과도한 변형을 완화시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

이러한 해석 결과를 근거로 관재 액압성형공정 설계시 초기 관재 직경 선정이 전체 성형제품의 성형성 결정에 충분히 큰 영향을 끼치고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 하중경로에 따른 성형성 분석

본 절에서는 엔진 크레들 성형공정에서 예비성형공정 이후 적용되는 최종 관재 액압성형공정에서의 관재 길이 방향으로 작용하는 압축력과 내부압력 조합으로 이루어진 하중경로에 대한 성형성을 분석하였다. 특히, 관재 액압성형공정에서의 하중 경로에 있어서 관재 길이 방향의 압축력은 성형성 평가 대상인 엔진 크레들의 전형적인 형상으로 인해 최종 성형성에 크게 영향을 미치지 않으므로, 기본적으로 가해지는 내부압력(Fig. 5 (a)의 Case1)을 액압성형 초기에 증가시키시는 것(Fig. 5 (a)의 Case2)과 성형 과정 중에 증가(Fig. 5 (a)의 Case3)시키는 추가적인 2가지 하중 경로에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 본 성형성 평가를 위해 고려된 각기 다른 하중경로는 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

본 절에서 고려된 3 가지 서로 다른 하중 경로에 대한 유한요소해석 결과로부터 성형 후 최소 두께와 최대 두께 감소율에 대한 분석 결과를 요약하여 Table 4 에 나타내었다. Table 4 에서의 해석 결과를 살펴보면, 관재 액압성형공정에 있어서 초기의 과도한 내부압력 증가는 최종 성형상태에서의 두께를 과도하게 감소시키는 역할을 하고 있음을 알 수 있었다. 이와는 반대로 성형 과정 중반 이후의 내부압력 증가는 두께 감소현상을 완화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

이는 예비성형공정을 거친 성형관재의 탄성회복 후 관재 액압성형공정에서 관재 길이방향의 압축력에 비해 상대적으로 긴 시간 동안 내부압

Table 4 Comparison of analysis results after hydroforming process

No.	Min. Value Thickness	Max. Value Thickness reduction rate
Case 1	2.048mm	23.98%
Case 2	2.050mm	23.91%
Case 3	2.054mm	23.78%

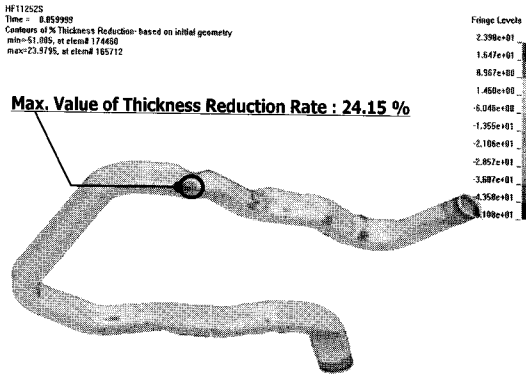


Fig. 6 Thickness reduction rate after finite element Analysis in standard preform

력을 서서히 가하는 것이 금형과 탄성회복된 관재재질 사이의 국부적인 마찰현상이 늦게 발생시키는 역할을 수행하여 추가적인 소성변형을 관재원주방향으로 균일하게 분포시키면서 해당 공정을 원활히 진행시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 예비성형체 형상에 따른 성형성 분석

본 연구에서 성형성 평가의 대상이 되는 엔진 크레들 부품은 전체적으로 초기 관재의 굽힘공정, 예비성형공정 그리고 최종 관재 액압성형공정 순으로 성형이 이루어진다. 이 때, 예비성형공정이 완료된 가공관재의 형상을 예비성형체(preform)라 정의하고, 본 절에서는 정의된 예비성형체의 형상에 따른 성형성을 유한요소해석을 통하여 분석하였다.

예비성형체 형상에 따른 성형성을 평가하기 위

하여, 먼저 앞선 3절에서 이용된 초기 관재들 중 직경 74mm인 관재를 이용하였으며, 하중조건은 앞선 4절에서의 Case 1을 이용하는 것을 표준모델로 정의하였다.본 절에서의 표준모델에 대한 유한요소해석 결과로부터 두께 감소율 분포는 Fig. 6에서 확인가능하며, 이 때의 최대 두께 감소율은 약 24.15%로 나타났다.

예비성형체 형상에 따른 성형성 분석을 위하여, 예비성형공정이 완료된 예비성형체에서 두께 감소 현상이 최대가 되는 표준모델에서의 단면과 예비성형체의 두께 감소를 완화시키기 위한 3가지 형태의 형상 수정 및 개선 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그리고, 엔진 크레들 최종 성형제품의 성형성 분석을 위하여 개선된 예비성형체 형상에 따른 유한요소해석 결과를 최대 두께 감소율을 기준으로 Table 5에 정리하였다.

최종 관재액압성형공정으로 인해 발생하는 두께 감소율을 기준으로 성형성을 향상시키기 위한 방안으로써 예비성형체 중 두께 감소율이 최대로 발생하는 단면을 분석한 결과로는, 단혀진 액압성형 금형 표면과 예비성형된 관재 사이 거리가 가장 먼 지점에서 두께 감소율이 최대로 발생함을

Table 5 Comparison of analysis results after hydro-forming process

Preform Model	Max. Value of Thickness reduction rate
1 ST Designed Preform	17.42%
2 ND Designed Preform	15.68%
3 RD Designed Preform	15.21%

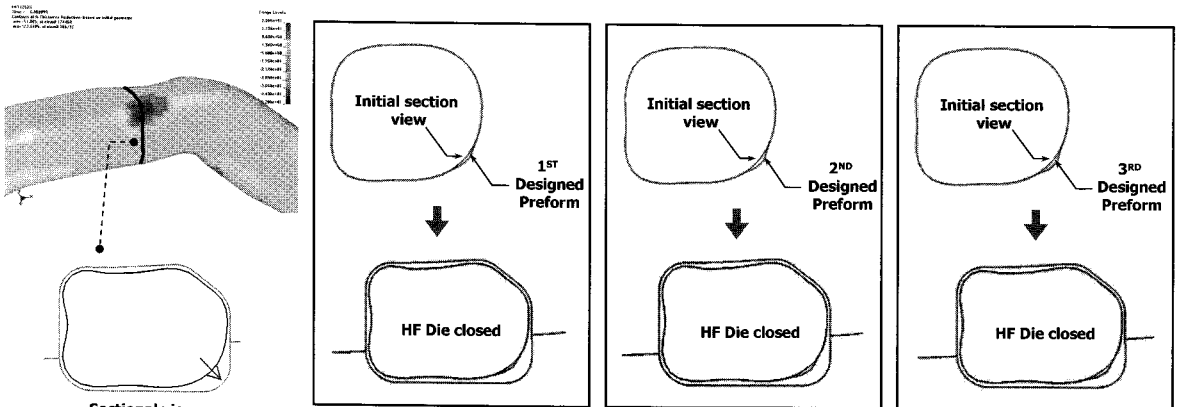


Fig. 7 Comparison of sectional configuration in re-designed preform before tube hydroforming process

확인할 수 있었다. 이를 개선하기 위하여 Fig. 7에서와 같이 두께 감소율이 최대인 예비성형체 영역을 금형과 가까이 위치시키는 개념을 적용하여 예비성형체 형상을 개선하였다. 이 때 이동시킨 거리는 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 전체 관재 직경과 비교하였을 때 상대적으로 작은 양으로 보정하였다. 그러나, Table 5에서 정리된 해석 결과를 살펴보면, 예비성형체 보정량 대비 최대 두께 감소율 개선 정도는 상대적으로 아주 크게 나타남을 알 수 있다.

일반적으로 승용차량용 엔진 크레들과 같이 직경 대비 길이가 긴 형상에 대한 성형공정은 크게 예비성형공정 및 최종 액압성형공정으로 구성되며 예비성형공정에서의 관재 변형량에 비해 최종 액압성형공정에서는 상대적으로 작은 변형량을 나타낸다. 따라서, 예비성형공정이 완료된 예비성형체에서는 아주 작은 양의 치수보정이 최종 관재 액압성형공정에서 성형성을 결정하는 결정적인 역할을 수행함을 확인할 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 승용차량용 엔진 크레들 부품의 관재 액압성형공정에 대한 성형성 평가를 위해서 3가지 주요 공정변수들에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 성형성 평가를 위한 유한요소해석 결과로써 예비성형공정에서의 초기 관재 직경이 커짐에 따른 두께 감소율 증가 현상을 확인하였으며, 이는 과도하게 큰 초기 관재 직경이 예비성형 금형내에서 추가적인 원주방향 변형을 수반함을 예측할 수 있었다. 그리고, 최종 관재 액압성형공정에서의 초기 관재 직경이 커짐에 따른 두께 감소율 감소 현상은 초기 관재 직경이 커짐에 따라 액압성형용 금형 벽면에 성형된 관재를 보다 더 가까이 위치시킴으로써 원주방향 변형을 감소시키는 역할을 함을 예측할 수 있었다.

아울러, 관재 액압성형공정 초기에 과도한 내부압력의 증가는 최종 성형상태에서의 두께를 과도하게 감소시키는 역할을 하며, 성형 과정 중반 이후의 내부압력 증가를 통해 두께 감소현상을 완화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

마지막으로, 승용차량용 엔진 크레들과 같이 직경 대비 길이가 긴 형상에 대한 관재 액압성형공정은 초기 관재의 굽힘공정, 예비성형공정 및 최

종 액압성형공정으로 구성되고, 예비성형공정에서의 관재 변형량에 비해 최종 액압성형공정에서는 상대적으로 작은 변형량을 나타낸다. 따라서, 예비성형공정이 완료된 예비성형체에서의 작은 양의 치수보정이 최종 관재 액압성형공정에서 성형성을 결정하는 결정적인 역할을 수행함을 확인하였다.

본 연구 결과에서와 같이, 관재 액압성형공정에 대한 초기 설계단계에서는 최종 성형성을 결정하는 주요 공정변수들에 대한 검토가 필수적으로 이루어 져야 하며, 유한요소해석을 통한 앞서 언급된 성형성 예측 및 평가가 유효한 역할을 할 수 있으리라 판단되어진다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었으며, 주저자는 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] F. Domann, Ch. Hartl, 1996, Hydroforming-a method to manufacture light-weight parts, J. Mater. Proc. Technol., Vol.60, pp. 669~676.
- [2] Y. Yamada, I. Aoki, 1966, On the tensile plastic instability in axi-symmetric deformation of sheet metals, J. JSTP., Vol.67, pp. 393~406(Japanese).
- [3] J. Tirosh, A. Neuberger, A. Shirizly, 1996, On tube expansion by internal fluid pressure with additional compressive stress, Int. J. Mech. Sci., Vol.38, pp. 839~851.
- [4] H. L. Xing, A. Makinouchi, 2001, Numerical analysis and design for tubular hydroforming, Int. J. Mech. Sci., Vol.43, pp. 1009~1026.
- [5] Z. C. Xia, 2001, Failure analysis of tubular hydroforming, J. Eng. Mater. Technol., Vol.123, pp. 423~429.
- [6] G. Nefussi, A. Combescure, 2002, Coupled bucking and plastic instability for tube hydroforming, Int. J. Mech. Sci., Vol.44, pp. 899~914.
- [7] S. W. Kim, J. Kim, H. J. Park, B. S. Kang, 2004, A prediction of bursting failure in tube hydroforming process based on necking conditions, Transactions of Materials Processing, Vol.13, No.7, pp. 629~634.