

컴퓨터 시뮬레이션(CAE)을 이용한 자동차용 엔진 크레들의 하이드로-포밍 공정 연구

김기주¹⁾ · 최병익²⁾ · 성창원³⁾

쌍용자동차 CAE팀¹⁾ · 한국기계연구원 마이크로응용역학팀²⁾ · 경희대학교 기계공학과³⁾

Hydro-forming Process of Automotive Engine Cradle by Computer Aided Engineering (CAE)

Kee Joo Kim^{*1)} · Byung-Ik Choi²⁾ · Chang-Won Sung³⁾

¹⁾CAE Team, Ssangyong Motor Co., 150-3 Chilgoi-dong, Pyeongtaek-si, Gyeonggi 459-711, Korea

²⁾Micro System & Structural Mechanics Team, Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Gyeonggi 449-701, Korea

(Received 23 April 2007 / Accepted 10 August 2007)

Abstract : Recently, the use of tubes in the manufacturing of the automobile parts has increased and therefore many automotive manufactures have tried to use hydro-forming technology. The hydro-forming technology may cause many advantages to automotive applications in terms of better structural integrity of the parts, lower cost from fewer part count, material saving, weight reduction, lower spring-back, improved strength and durability and design flexibility. In this study, the whole process of front engine cradle (or front sub-frame) parts development by tube hydro-forming using steel material having tensile strength of 440 MPa grade is presented. At the part design stage, it requires feasibility study and process design aided by CAE (Computer Aided Design) to confirm hydro-formability in details. Effects of parameters such as internal pressure, axial feeding and geometry shape on automotive sub-frame by hydro-forming process were carefully investigated. Overall possibility of hydro-formable sub-frame parts could be examined by cross sectional analyses. Moreover, it is essential to ensure the formability of tube material on every forming step such as pre-bending, preforming and hydro-forming. At the die design stage, all the components of prototyping tools are designed and interference with press is examined from the point of geometry and thinning.

Key words : Hydroforming(액압성형), Engine cradle(엔진 크레들), Axial feeding(축방향 피딩), Bending(벤딩), Thinning(두께감소)

1. 서론

최근 자동차에 대한 고객의 성향은 자동차의 동력성능, 조향안전성 및 연비 등의 기본성능에 대한 고성능화 및 쾌적운동, 운전편의성, 안전성등의 고급화를 동시에 지향하고 있다. 특히 사륜구동(four

wheel drive) 자동차의 주요 동력전달(power-train) 부품의 하나인 액슬(axle)과 구동축(propeller shaft)은 엔진 및 변속기(transmission)와 함께 사륜구동 자동차의 가진원 으로 작용하여 자동차의 쾌적함과 안락함의 욕구를 충족시켜주기위한 소음, 진동저감에 대한 대책이 절실히 요구되는 실정이다.

하이드로포밍(Hydro-forming) 기술은 지난 10여

*Corresponding author, E-mail: kjkimfem@smotor.com

년간 자동차산업에서 비약적인 성장을 해왔다. 자동차산업에서 본격적으로 사용하기 이전 초기의 하이드로포밍 부품은 단순한 다지관 형태가 대부분으로서 위생용 부품 또는 악기류 제조에 적용되었다.¹⁾ 하이드로포밍 기술이 비로소 경쟁력을 갖추게 된 계기는 최근 들어 고압 유압 시스템, 컴퓨터에 의한 정밀제어 기술의 발전 그리고 프레스의 대형화를 들 수 있다. 이 기술은 기존의 프레스 성형 공법에 비하여 부품수의 감소, 일체화 성형, 부품수 및 금형의 감소로 인한 비용절감, 펀칭 또는 용접 공정의 생략, 높은 형상 정밀도, 부품의 강성 및 내구성 향상, 설계의 유연성 등 많은 장점을 가지고 있다.²⁻⁴⁾ 하이드로포밍 기술을 이용하여 엔진크레들(Engine Cradle), 배기계 부품, 리어 서브프레임(Rear sub-frame), 라디에이터 서포트(Radiator Support), 사이드 레일(Side Rail), 캠 샤프트(Cam Shaft) 및 각종 차체 부품에 이르기까지 다양한 자동차 부품의 생산이 가능하다. 하이드로포밍용 튜브소재는 부품의 형상대로 제작된 금형의 내부에서 고압의 유체를 통하여 확관 성형된다. 적절한 길이로 미리 절단된 튜브는 최종형상에 유사한 형태로 굽힘가공을 받게 되며 일반적으로 하이드로포밍 금형에 안착되기 위하여 프리포밍 공정(Pre-forming Process)을 거치게 된다. 대부분의 경우 프리포밍 형상은 하이드로포밍 공정의 성패에 결정적인 요인이 된다. 한편, 프리포밍된 튜브는 하이드로포밍 금형으로 옮겨진 후 내부 유체를 통하여 성형된다.

차량경량화의 목표달성을 위하여 사용되는 튜브소재의 강도가 증가하는 추세에 있다. 현재 인장강도 300~400MPa급 소재가 널리 이용되고 있으나 최근들어 새시부품을 중심으로 인장강도 400MPa급 강재 적용이 확산되고 있다. 본 연구에서는 비교적 고강도인 인장강도 440MPa급 강재를 이용한 하이드로포밍 엔진 크레들(혹은 Front sub-frame) 부품을 컴퓨터를 활용하여 개발하는 전 과정을 다루고자 하며 개발된 부품의 성공적인 개발여부를 판단하는데 필요한 주요인자인 형상 및 두께 감소에 대한 컴퓨터 시뮬레이션결과를 시험결과와 비교하여 엔진 크레들의 성공적인 설계 자료로 활용코자 한다.

2. 부품 설계

새시(Chassis)부품의 대물 파트인 엔진 크레들은 자동차 새시 부품으로서 승용차의 앞쪽 하단부에 위치하여 엔진을 서브할 뿐만 아니라 차체와 휠(Wheel)을 연결하는 역할을 한다. 앞쪽 휠은 이 부품에 여러 개의 링크 부품으로 연결되어 편안한 승차감을 제공한다. 이 엔진 크레들은 메인멤버(Main Member)와 크로스멤버(Cross Member)로 구성된다. 본 연구에서는 이 메인멤버 파트를 튜브 하이드로포밍 가공공정에 의하여 개발하였으며 Fig. 1에 그 형상을 나타내었다.

먼저 부품은 하이드로포밍 공정에 의한 제조 가능성을 확인하기 위하여 길이방향으로 상세한 분석을 하였다. Fig. 2는 메인멤버 부품의 단면분석결과를 나타내었는데 각 숫자가 나타내는 의미는 각 단면의 원주길이이다. 이를 통하여 부품의 최대 및 최소 단면 원주길이와 최소 코너 반경을 얻게 된다. 또한 이 결과로부터, 요구되는 튜브의 길이, 프레스 하중 및 최대 가압력을 계산할 수 있다. 이 부품의 경

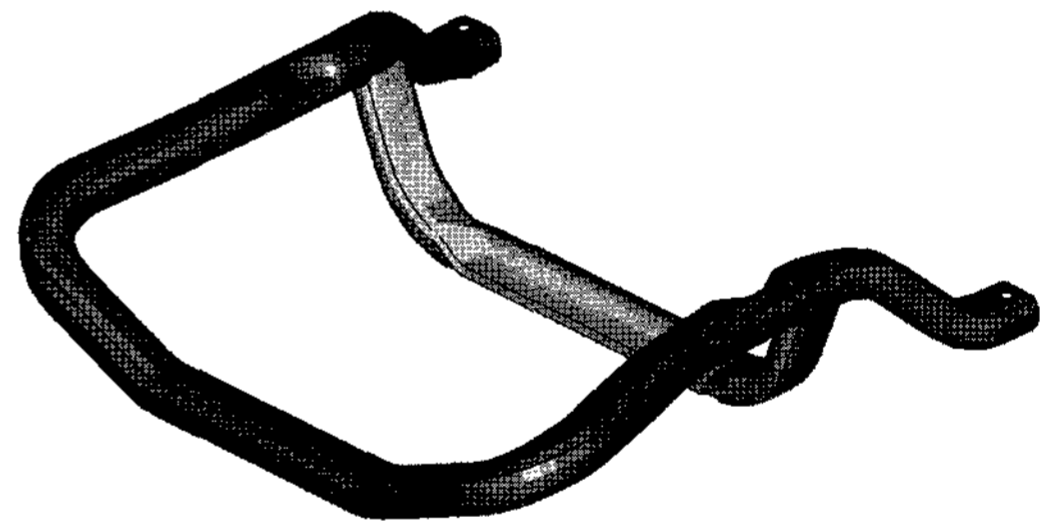


Fig. 1 Geometry of main member & cross member of engine cradle

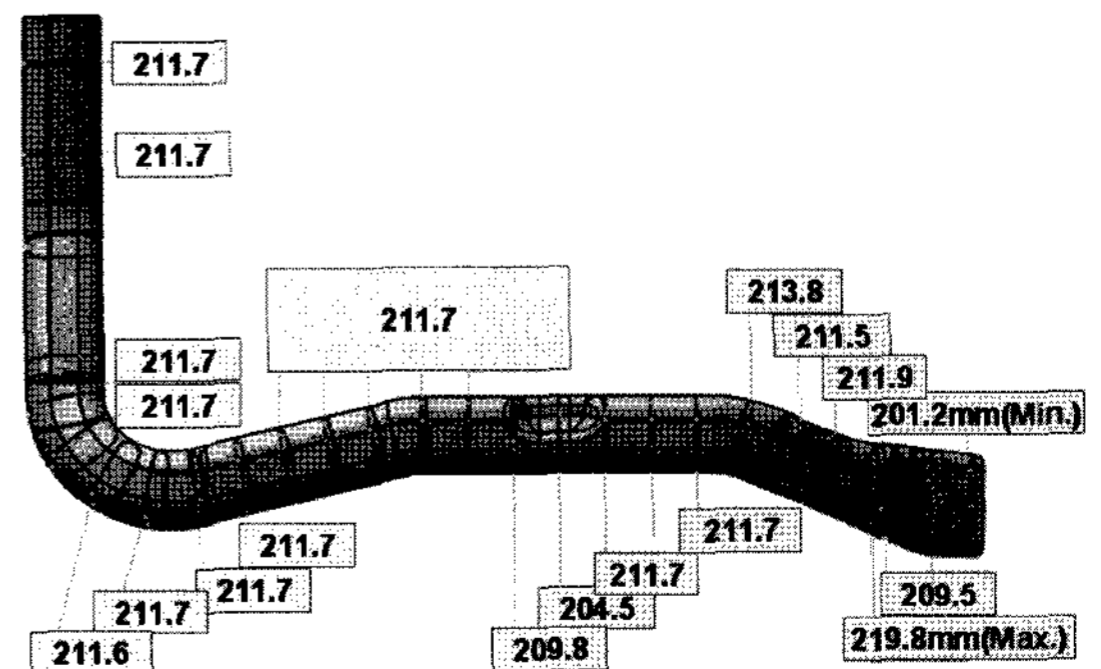


Fig. 2 Analyses of cross sections of main member along the half symmetry part, (unit: mm)

Table 1 Mechanical properties of tube material

| Elastic modulus, GPa | Yield strength, MPa | Tensile strength, MPa | Uniform elongation, % | Tensile elongation, % | n |
|----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|
| 210 | 365 | 473 | 16.3 | 31.4 | 0.15 |

우 최소 및 최대 원주길이는 201.2mm, 219.8mm이며 이때의 확장율은 각각 0.8%, 10.3%이다. 적정 튜브 사이즈는 원주길이 199.5mm를 갖는 외경 63.5mm(2.5") 튜브이며 설계된 제품의 원주길이가 튜브의 원주길이보다 커야 확관을 이용하여 하이드로포밍 공정으로 원활한 성형가공이 가능하다. 일반적으로 허용하는 최대 확장율은 10%이며 이 부품의 경우 최대 확장율 지점이 부품의 양 끝단부에 가까우므로 더욱 안전하다 할 수 있다. 하이드로포밍 공정 시뮬레이션을 위한 튜브소재 재질은 인장시험을 통하여 분석하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 인장강도는 473MPa이며 탄소성 가공경화 거동을 보이는 재료로서 해석에서는 등방성을 가정하였다. 성형해석을 위한 모델은 상·하부 금형 및 기하학적 벤딩 형상을 갖는 튜브로 구성되며 벤딩 공정에 대한 성형해석을 먼저 행하였다.

Fig. 3에는 하이드로포밍 공정에 의하여 실제로 제작될 부품의 성형전 벤딩 해석 결과를 나타내었다. 계산에 사용된 프로그램은 성형 및 충돌해석 상용 프로그램인 LS-Dyna를 사용하였다. 계산결과 벤딩반경 100 mm를 갖도록 벤딩시 총 10회의 벤딩으로 초기 2.3 mm 두께의 튜브는 1.9~2.7 mm의 두께로 변화함을 알 수 있다. 본 벤딩가공 해석결과를 하이드로포밍 금형에 모의 삽입한 결과 엔진크레들의 메인멤버는 프리벤딩 공정이외에 추가의 프리포밍 공정이 있어야 하이드로포밍 금형에 안착이 가능함을 알 수 있었다.

Fig. 4에는 성형해석용 모델 중 하부금형 및 튜브를 나타내었다. 하이드로포밍 공정 시뮬레이션은 벤딩해석에서와 마찬가지로 LS-DYNA를 사용하였다. 상·하 금형이 닫히는 동안 튜브에는 찌그러지는 변형이 발생하게 되는데 이때 튜브의 폭이 큰 부분에 핀칭(pinching) 현상이 나타나기 쉽다. 이러한 핀칭 현상은 초기 튜브가 크지 않더라도 금형이 닫히는 동안 튜브가 편평하게 변형 될 경우에도 쉽게 발

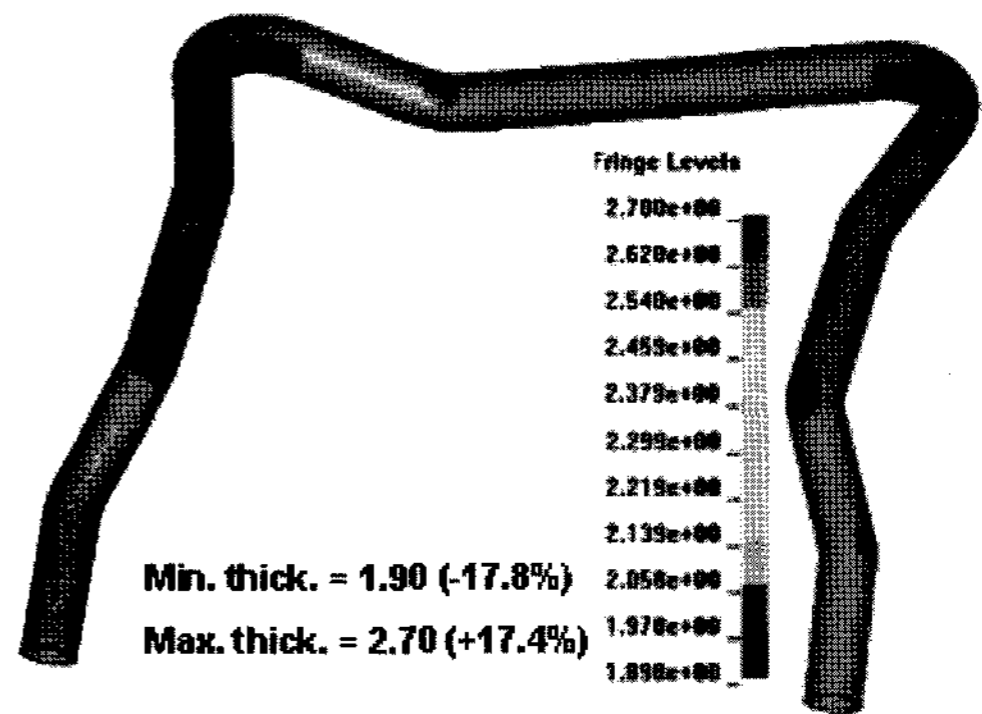


Fig. 3 Thickness after simple bending simulation

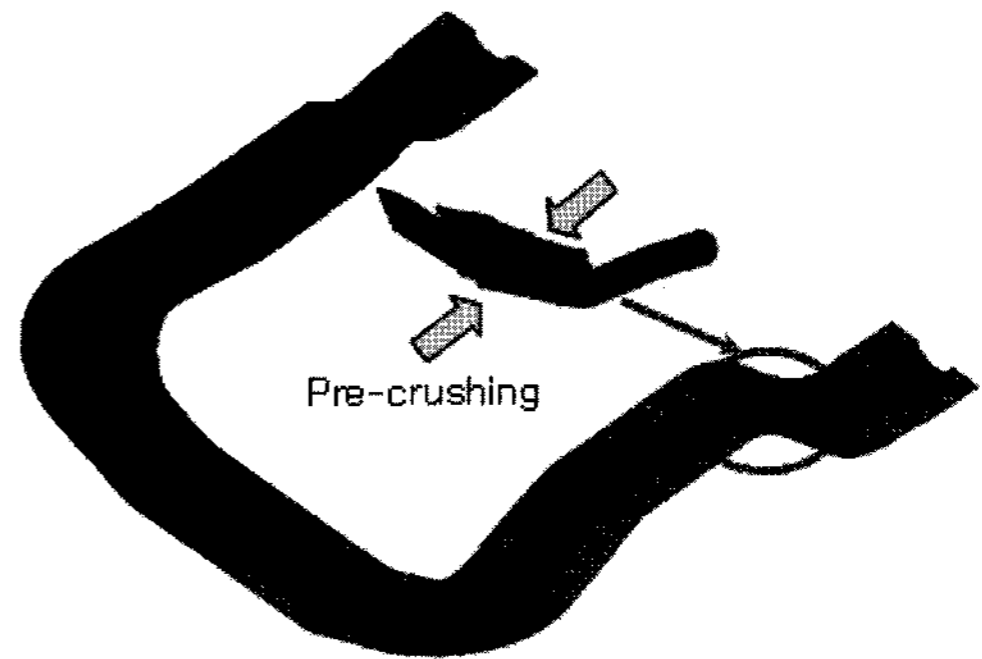


Fig. 4 Initial mesh of hydro-forming die cavity and tube

생할 수 있다. Fig. 4에 프리-크러싱(Pre-crushing) 시킨 부위를 나타낸 것과 같이 표시한 일부분을 프리-크러싱(간이 프리포밍 공정)을 이용하여 수축시킴으로써 금형이 닫히는(die closing) 동안 튜브가 핀칭되어 간섭되는 것을 피할 수 있다.

Fig. 5에는 양쪽 끝단부 피딩(Feeding)을 20mm 씩 가하여 하이드로포밍 공정이 완료된 후의 형상 및 두께감소율 분포를 나타내었다. 금형이 닫히면서 찌그러진 부분들이 압력에 의해 퍼졌으며 금형 형상대로 완전히 성형이 이루어졌음을 알 수 있다. 이때 필요한 최고 성형압력은 1500bar였으며 최대 두께 감소율(thinning)은 B-Zone에서 25.0%로 예측되었다. 특히, C-Zone의 경우 피딩전 최대 두께 감소율이 26.5%였으나 20mm의 끝단부 피딩으로 22.6%로 두께감소폭이 감소하였다. 피딩이란 재료의 양 끝단에서 튜브를 다이 안으로 이송(feed)하여 재료공급을 해줌으로써 두께감소를 줄이는 역할을 하는데, 끝단부 피딩으로 두께는 19.5%로 증가하였다. 부품설계측면에서 이 소재에 대한 최대 허용 두께

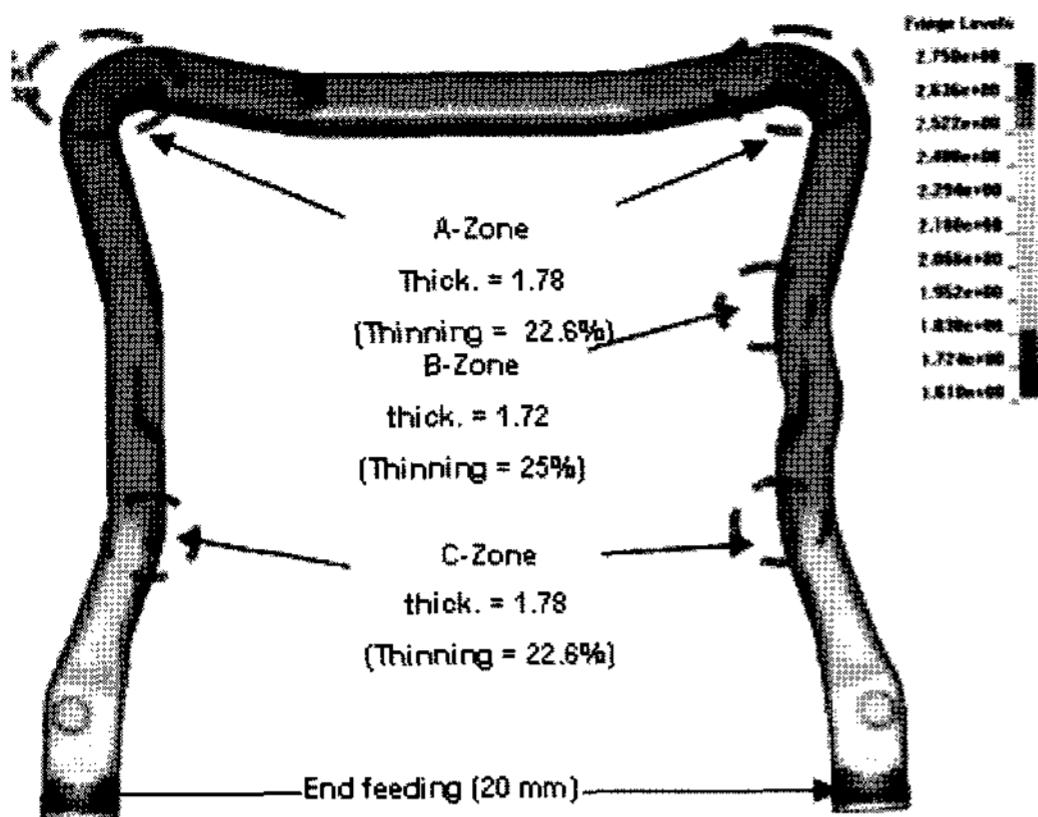
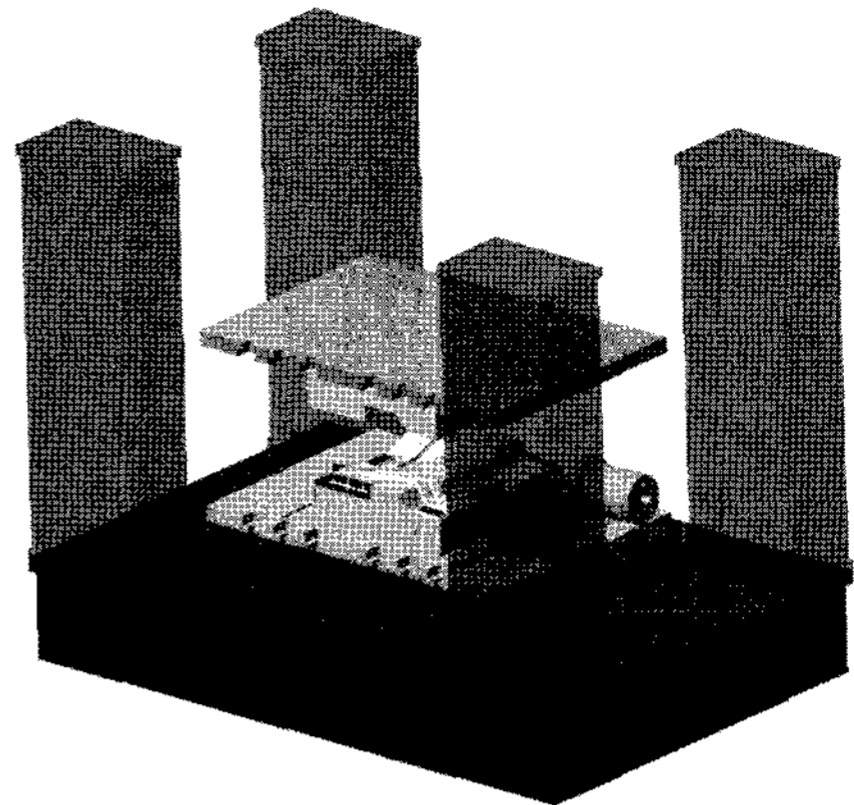


Fig. 5 Predicted geometry and distribution of thinning after hydro-forming process with end feeding



(a) ISO-view

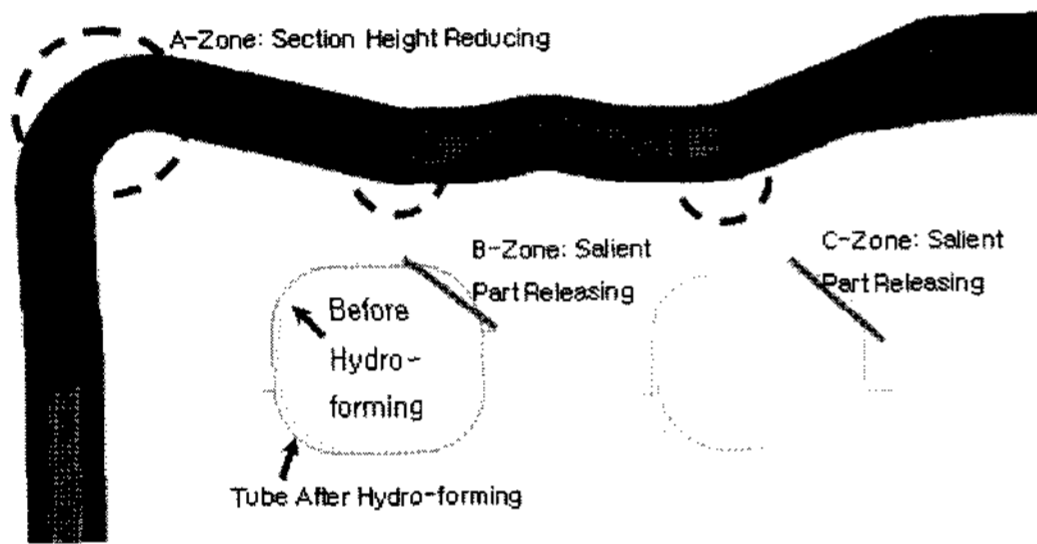
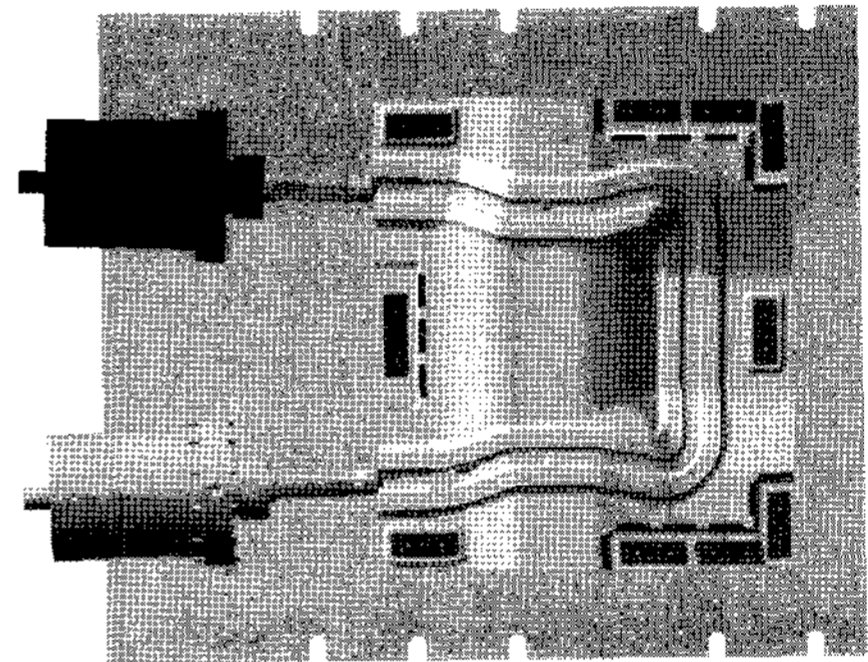


Fig. 6 Examples of geometry modification



(b) Top view

Fig. 7 Overall die design including press column (iso-view and top view)

감소율은 25%로서 거의 허용두께에 닿을 만큼 두께 감소가 있는 것으로 판단된다. 이 성형 해석의 경우 끝단부에 20mm의 피딩을 가하여 소재의 과도한 두께 감소를 막고 그로 인한 파단을 막을 수 있다. Fig. 5의 해석결과에 나타나듯이 A, B 및 C-Zone 각각의 두께가 20% 이상 감소하였으므로 이를 개선하기 위한 제품 설계 단면 수정사례를 Fig. 6에 나타내었다. A-Zone의 경우 단면 높이를 축소하고, B 및 C-Zone의 경우는 하이드로포밍 성형 전과 성형 후(초기 성형 전 단면이 확장되어 부풀어진 그림) 제품의 설계 단면 그림의 모서리 한 부분을 사선으로 커팅하여 돌출부를 완화시켜 확관을 자체를 줄임으로써 단면 두께 감소폭을 줄일 수 있다.

3. 금형 설계

하이드로포밍용 시작금형의 전체적인 설계 내역을 Fig. 7에 나타내었다. 상세한 금형 설계는 CATIA V5를 이용하여 수행하였다. 하이드로포밍 금형은

가이드플레이트(guiding plate), 압력플레이트(pressure plate), 가이드핀/부쉬(guide pin/bush), 이젝터(ejector), 단축실린더(axial cylinder) 등의 다양한 부품들로 구성된다. 금형의 설계시에는 금형 본체와 프레스와의 간섭 여부도 반드시 확인되어야 한다.

한편, 정확한 하이드로포밍 압력과 프레스의 용량을 미리 계산하여 장비가 성형 가능한 용량인지를 다음의 식들로부터 확인하여야 한다. Fig. 8에 나타난 두께가 얇은 파이프가 내압을 받을 때 파이프의 항복강도는 식 (1)과 같다.⁵⁾

$$\sigma_y = P_i R_i / t \quad (1)$$

여기서, P_i , σ_y , t , R_i 는 각각, 내부 하이드로포밍 압력(internal hydroforming pressure), 재료항복강도(material yield strength), 튜브벽두께 및 유효 튜브벽 내경(effective internal radius of the tube wall) 이다.

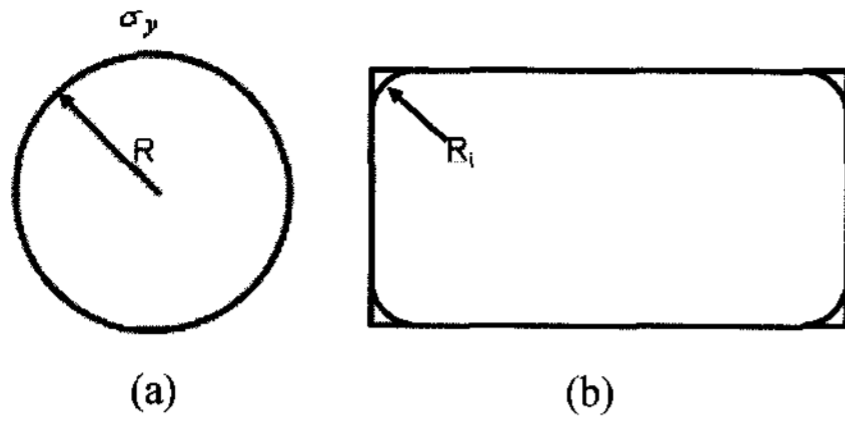


Fig. 8 Relationship between internal pressure and wall thickness

Fig. 8의 그림 (b)는 그림 (a)의 튜브를 하이드로포밍 가공했을 때 사각형 단면으로 형상변화한 것을 간략화한 것이다. 식 (1)에 나타낸 바와 같이 재료의 두께와 항복응력이 증가함으로써 성형을 위한 내부압력은 증가하게 되고 R_i 가 감소할수록 큰 내부압력이 필요하게 된다. 이를 활용하여 튜브의 최대내부압력(P_{max})을 계산하는 경험식은 식 (2)와 같다.^{5,6)}

$$P_{max} = 1.1547 \cdot \frac{\sigma_{uts}}{R_{min} - t/2} \cdot t \tag{2}$$

여기서, σ_{uts} 는 소재의 인장강도이며, R_{min} 은 최소곡률반경이다. 또한, 프레스의 용량을 결정하는 것은 제품의 전체 면적이다. 프레스 용량(하이드로포밍용 금형을 닫는데 걸리는 힘), F_{clamp} 는 식 (3)과 같이 튜브의 최대내부압력(P_{max})과 튜브의 크기에 비례한다.

$$F_{clamp} = P_{max} \cdot d_i \cdot l \tag{3}$$

여기서, d_i 는 제품의 내경(tube inner diameter), l 은 튜브의 길이이다. 이를 고려하여 제품의 성형을 위한 프레스 용량을 결정하여야 한다. 한편, 축실린더(Axial Cylinder)는 파이프 내부의 intensifier 압력의 전달 및 sealing과 피딩(Axial Feeding)으로 성형성을 확보하는 기능을 하며 Feeding이 필요한 공정에서는 축힘(Axial Force)를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F = F_s + F_a + F_f \tag{4}$$

여기서, F_s 는 튜브의 내부압에 대한 봉합힘(Sealing Force Max. Force to seal tube ends)로 다음식 (5)와 같다.

$$F_s = P_{max} \cdot \pi \left(\frac{d_0 - 2t}{2} \right)^2 \tag{5}$$

d_0 는 튜브 직경(tube outer diameter)이다. 식 (4)에서, 튜브 소재를 소성변형 시키는 힘, F_a 는

$$F_a = Tube_Section_Area \times \sigma_z = (d_0 - t)\pi \times t \times 1.2 \times \sigma_{uts} \tag{6}$$

식 (4)에서, 마찰에 대한 저항력 F_f 는

$$F_f = \mu \cdot P_{max} \cdot A_f \tag{7}$$

여기서, μ 는 금형과 튜브간 마찰계수(friction coefficient between die and punch)이며, A_f 는 압력을 받고 있는 면적(friction surface in areas where material is moving)이다. 상기 수식을 이용하여 피딩하는데 필요한 축힘을 계산한 결과 98.6 ton으로 계산되었으며, 계산에 사용한 값들을 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 2 Calculation results of press capacity security

| | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Expansion ratio, min. | 0.8 % |
| Expansion ratio, max. | 10.3 % |
| Corner radius, min. | 10 mm |
| Tube size (determined) | 63.5 mm (outer diameter) |
| Thickness of tube wall (given) | 2.3 mm |
| Max. force to seal tube ends | 38.1 ton |
| Force to move materials at tube ends | 25.1 ton |
| Force by the friction | 35.4 ton |
| Calibration pressure, min. | 1,398.4 bar |
| Axial force for feeding | 98.6 ton |

4. 시작품 제작

Fig. 9는 성형 완료된 하이드로포밍 튜브를 나타내었다. 하이드로포밍 공정에서 튜브의 양 끝단은 두께감소량을 줄이기 위하여 20 mm 씩 피딩하였다. 시작품을 제작하는 동안에는 터짐, 주름 등의 여러 가지 성형불량이 발생하였으며, Fig. 10에는 본 공정 개발 시 발생했던 성형불량의 사례를 보여주고 있다. 터짐 불량은 주로 모서리 부분에서의 국부적인 변형에 의해 발생하였다(Case (a)). 이 경우는

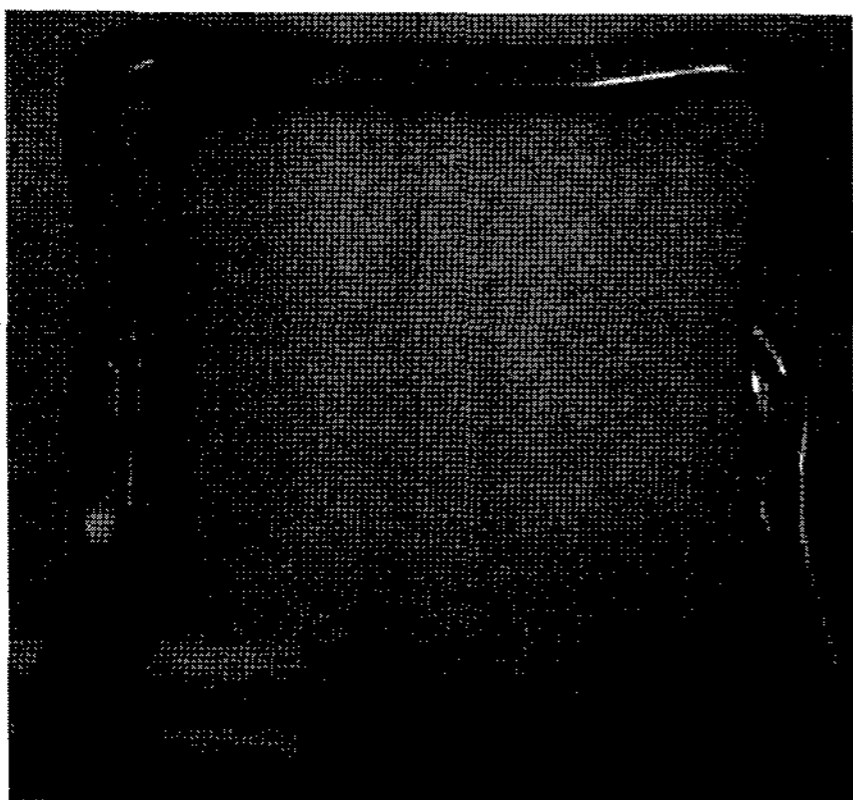


Fig. 9 Hydro-formed part

벤딩된 튜브의 위치가 한쪽으로 치우침에 의하여 터짐 불량도 발생하기도 하였다(Case (b)). 이 경우 벤딩 라인을 조절을 통하여 상대적으로 두께가 얇은 벤딩 외측부를 좀더 금형면에 가깝게 해 줌으로써 해결하였다. 편평한 면에 발생한 주름은 하이드로포밍 성형시 이 부분에 윤활유가 갇히는 현상에 의하여 발생하였다(Case (c)). 이 경우에는 윤활유의 도포량을 적절히 줄임으로써 주름을 제거하였다.

5. 해석결과와 실험결과의 비교

성형품에 대하여 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 주요 위치의 원주길이를 측정하였다. Fig. 11은

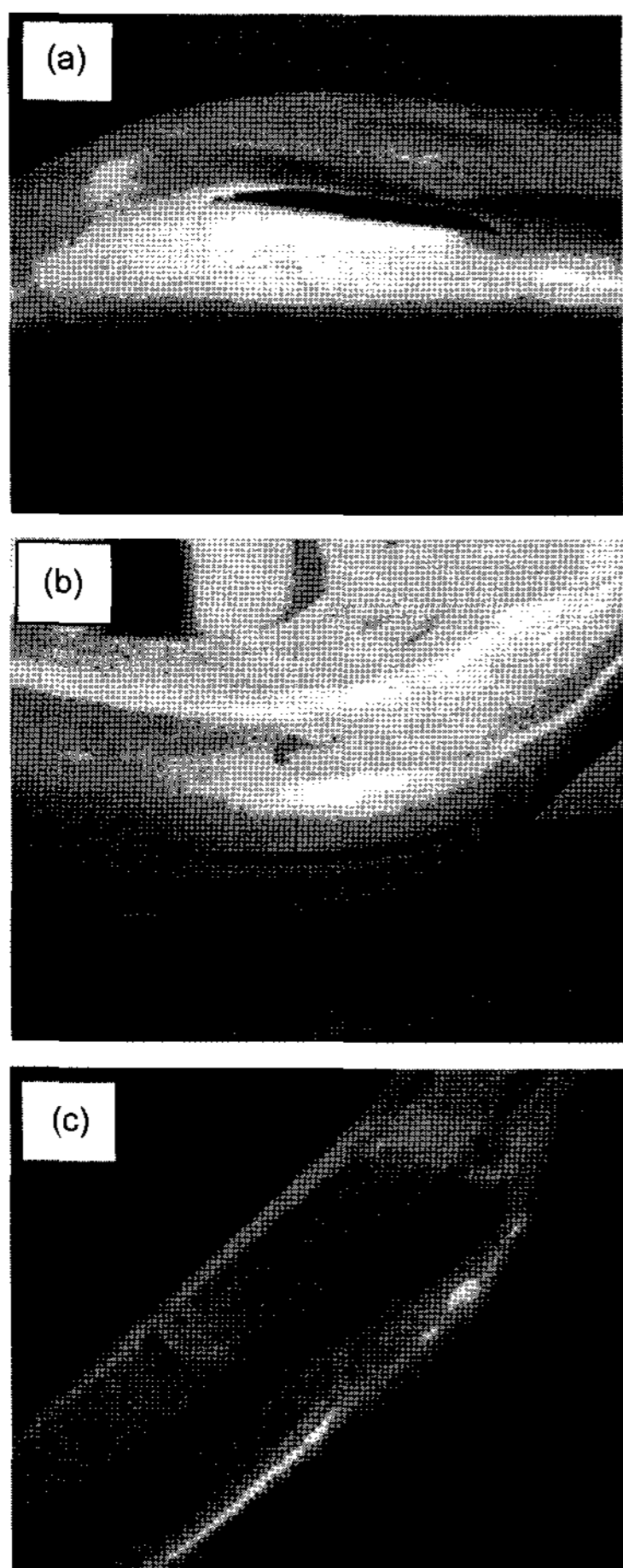


Fig. 10 Various defects on hydro-formed part. position of (a), (b) and (c)

적절한 윤활을 통하여 성형 중 소재의 유동을 원활하게 해 줌으로써 개선이 가능하였다. 금형 장착시

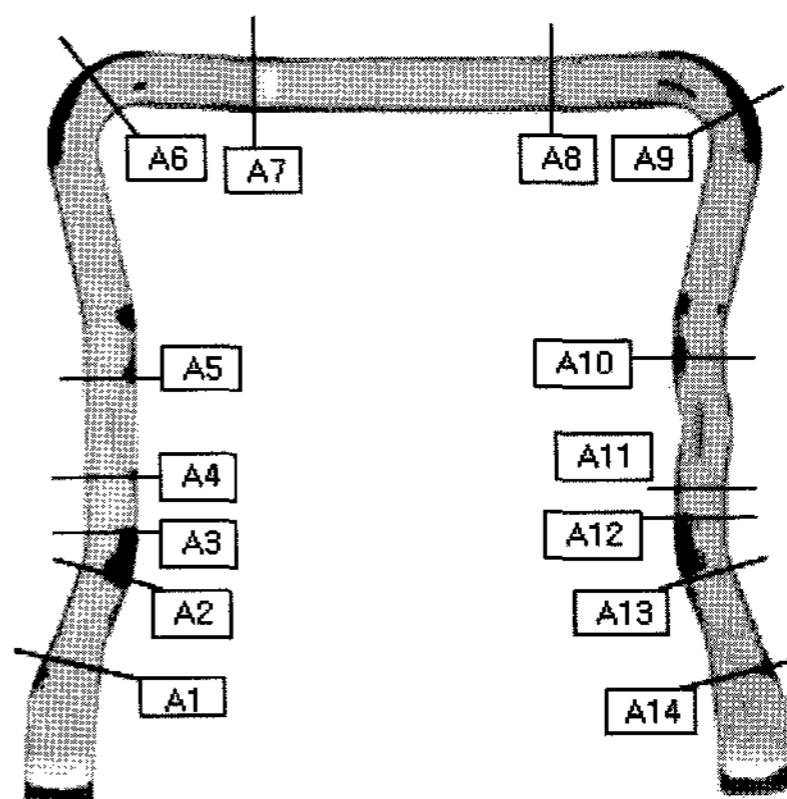


Fig. 11 Positions where the thickness is measured on the hydro-formed part

Table 3 Comparison of the thickness variation between calculated and measured values

| Position | Measured | Calculated | Deviation |
|----------|----------|------------|-----------|
| A1 | 2.05 mm | 2.03 mm | 1.0% |
| A2 | 1.81mm | 1.81 mm | 0.0% |
| A3 | 1.83 mm | 1.83 mm | 0.0% |
| A4 | 1.89 mm | 1.93 mm | -2.1% |
| A5 | 1.83 mm | 1.85 mm | -1.1% |
| A6 | 1.84 mm | 1.76 mm | 4.4% |
| A7 | 1.60 mm | 1.72 mm | -7.5% |
| A8 | 1.96 mm | 1.87 mm | 4.6% |
| A9 | 1.82 mm | 1.80 mm | 1.1% |
| A10 | 1.79 mm | 1.75 mm | 2.2% |
| A11 | 1.79 mm | 1.75 mm | 2.2% |
| A12 | 1.74 mm | 1.79 mm | -2.9% |
| A13 | 1.78 mm | 1.79 mm | -0.6% |
| A14 | 2.17 mm | 1.95 mm | 10.1% |

성형품의 단면을 구성하는 최소두께를 측정된 위치를 나타내었으며 (A1~A14 커팅단면) 측정결과를 표 3에 나타내었다. 측정결과 최소 두께는 1.60 mm(A7 위치)이며 그 위치는 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다. Table 3의 측정 결과에서 보는 바와 같이 설계대비 최대 차이는 10.1%로(A14 위치) 나타났으며, 그 이유는 벤딩에 의한 두께 감소가 시뮬레이션에 포함되지 않았고, 실제로 최대 두께 감소는 소재가 약간 연신되는 벤딩부 근처에서 발생하였기 때문이다.

6. 결론

인장강도 440MPa급 고강도 강재를 이용하여 엔진크레틀용 하이드로포밍 메인멤버를 성공적으로 개발하였다. 메인멤버의 부품설계 단계에서는 부품의 형상에 대한 초도 분석 및 전체적인 공정 설계가 이루어졌다. 요구되는 확관율은 모두 가능한 수준에 있었으며 예상되는 프레스 용량, 최대 가압력 및 피딩력은 보유하고 있는 설비를 이용하여 가능함을 확인하였다. 또한, 상세한 시뮬레이션 결과에서는 하이드로포밍에 의한 최종 두께 감소율이 가공하기에 양호한 수준으로 예측되었다. 시작금형을 설계, 제작하여 실부품을 제작하였으며 두께 감소율 및 형상을 측정하였다. 최소 두께는 1.60 mm이며 최소 두께가 나타나는 위치는 시뮬레이션 결과와 동일한

위치에서 발생하였으며 이는 부품개발을 위한 기준치에 부합하였다. 또한 실제 가공된 부품의 형상은 컴퓨터 해석결과와 유사한 경향을 나타내었다.

Reference

- 1) F. Dohmann and Ch. Hartl, "Tube Hydroforming-Research and Practical Application," J. Mater. Process Tech., Vol.71 pp.174-186, 1997.
- 2) S. Nakamura, H. Sugiura, H. Onoe and K. Ikemoto, Hydro Mechanical Drawing of Automotive Parts, J. Mater. Process. Tech., Vol.46, pp.491-503, 1994.
- 3) M. Ahmetoglu and T. Altan, "Tube Hydroforming-State-of-the-art and Future Trends," J. Mater Process Tech., Vol.98, pp.25-33, 2000.
- 4) M. Ahmetoglu, K. Sutter, S. J. Li and T. Altan, Tube Hydroforming: Current Research, Applications and Nee for Training J. Mater Process Tech., Vol.98, pp.224-231, 2000.
- 5) N. Asnafi, "Analytical Modeling of Tube Hydroforming," Thin-Walled Structure, Vol.34, pp.295-330, 1999.
- 6) J. Kim, L. P. Lei, S. Kang and B. Kang, "Bursting Failure Prediction in Tube Hydroforming Process," Transactions of KSAE, Vol.9, No.6, pp.160-169, 2001.