

후륜 현가장치용 CTBA 튜브 프레스 성형공정 개발

김세호[#] · 김기풍¹ · 박천일²

Development of the Tube Press Forming Process for the CTBA of the Rear Suspension Assembly

S. H. Kim, K. P. Kim, C. I. Park

(Received March 13, 2008)

Abstract

Process design is carried out for a press forming of a CTBA in the rear suspension assembly based on the result of the finite element analysis. The analysis simulates the two-stage stamping process with the initial design and it fully reveals the unfavorable mechanism which develops inferiorities during forming. In this paper, a new design guideline is proposed to modify the process and tool shapes for a single-stage forming process. With the improved tool design, prototypes are fabricated after several try-out processes. Results of the durability tests show that the design requirement of the part is satisfied and the effective weight reduction is achieved.

Key Words : Tool Design, CTBA, Tube Press Forming, Finite Element Analysis, Durability

1. 서 론

최근 환경문제 및 에너지 절감 필요성의 대두와 운송수단의 고속화로 인하여 차량의 경량화, 안전화가 차량설계, 생산분야의 목표가 되고 있다. 운송수단의 고속화는 차량이나 열차의 충돌 시 구조적인 안전성을 요구하게 되었으며, 특히 자동차의 경우 배기가스 규제에 대응 및 연비향상을 목적으로 하는 차량 경량화가 필수적으로 대두되고 있다. 서로 상반되는 경량화와 안전도 강화를 위한 차체의 고강도, 고강성화의 목표를 동시에 만족시키기 위하여 최근의 자동차기술은 고장력 강판, 구조용 폼, 알루미늄, 마그네슘 등의 경량 고강도 신소재 개발과 튜브 하이드로포밍, 재단용 접강판 등의 신성형기법 등을 이용한 부재성형 기술개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

본 연구의 대상은 Fig. 1에 도시한 차량 후륜 현가장치의 부품인 리어 크로스 멤버의 역할을 하는 CTBA(Coupled Torsion Beam Axle)이다. CTBA는 차륜 및 현가장치와 차체를 연결하는 역할을 하며 현가장치의 진동, 소음을 차단함과 동시에 압과 링크를 차체에 직접 체결하지 않기 때문에 현가장치가 차체강성에 미치는 영향이 작아진다. 따라서, 현가장치 피봇부의 강성을 높일 수 있어 적절한 기하학적 특성을 얻게 해주는 장점이 있다. 현재 소형차종에서는 두께 5~6mm인 단일 후판을 V-빔 형태로 가공하여 판재 프레스 제품 부재로 제작하는 방식이 사용되고 있다. 종래 방식대로 제작된 부품은 현가장치 타부품과의 결합시 용접부 플랜지의 형상을 용이하게 설계하기 어려우며, 플랜지부도 부재의 중심과 같은 두께를 가져야 하므로 중량이 크게 증가하게 된다. 후판

1. 한국생산기술연구원 동력부품지원센터
2. (주)체시스 기술연구소
교신저자: 대구대학교 자동차·산업·기계공학부,
E-mail: mvksh@daegu.ac.kr

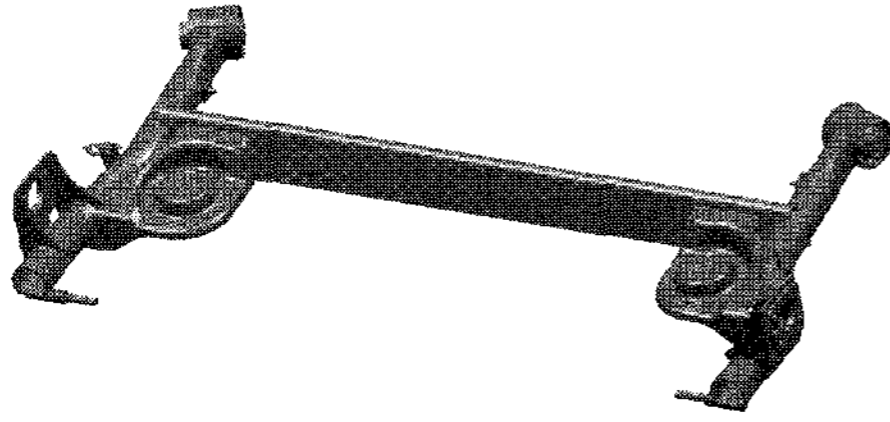


Fig. 1 Beam type CTBA with the stamping process of a single thick sheet metal

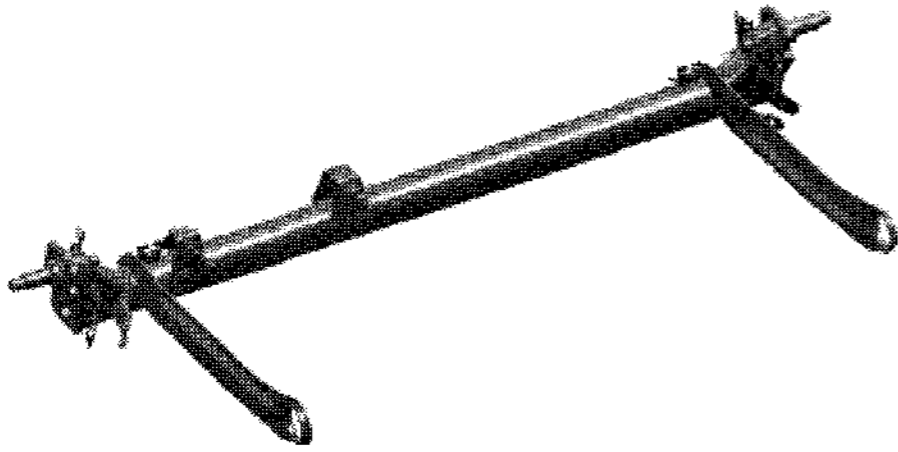


Fig. 2 CTBA with the tube forming process

가공의 특성상 부재의 형상을 자유롭게 설계하는데 제약을 받게 되어 충돌성능 및 레이아웃 등에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 현재 기존의 판재 프레스 성형으로 제작하던 CTBA를 Fig. 2에 도시한 바와 같이 중공형 튜브 형태의 원소재료부터 튜브 프레스 성형을 통해 단면을 변화시켜 일체형 부품으로 제작하는 방식을 개발하고 있다. 주로 준중형 이하 차종의 경량화를 위하여 개발이 진행중이며, 기존 판재 프레스물 대비 10% 정도의 경량화 효과가 있는 것으로 알려지고 있다. 튜브형 CTBA의 생산을 위한 금형은 일반적으로 2단계의 프레스 성형법[1~3] 또는 중심부는 프레스성형으로 제작하고 타 부재와의 연결부는 하이드로포밍을 이용하여 제작[4, 5]되고 있다.

본 논문에서는 튜브형 CTBA의 제품개발을 위한 금형설계를 유한요소해석을 통하여 수행하였으며, 초기 설계안의 문제점을 해석을 통하여 파악하고 문제점을 해결하는 설계수정방안을 제시하였다. 기존의 방식 대비 공수 및 비용절감의 효과를 얻기 위하여 1 단계의 성형만으로 제품을 생산할 수 있는 금형설계안을 제시하였다. 금형설계안으로부터 시제품을 생산하고, 해당제품의 내구특성을 시험을 통하여 분석하였다. 연구의 결과로 경량화 효과가 큰 일체형 튜브 프레스 금형 및 제품을 개발하였다.

2. 초기 금형설계안의 해석 및 분석

본 논문에서는 유한요소 성형해석을 통하여 튜브 프레스 성형공정 초기안을 분석하고 금형설계 데이터의 문제점을 파악하였다. 파악된 문제점을 제거하고 추후 양산에 적용하기 위한 금형 데이터 수정 방안을 제시하였다.

2.1 초기 금형설계안

초기설계에서는 제품을 생산하기 위하여 2 단계 공정으로 분할하여 성형을 수행하였다. 1 단계 공정(OP10)에서는 제품을 중간성형하고, 추후 2 단계 공정(OP20)에서 최종성형하는 방법을 사용하였다. 공정 후 트리밍 및 타부재와의 접합공정은 고려하지 않았다. 얻고자 하는 부품의 최종형상은 Fig. 3 과 같다. 초기 설계의 최종 제품형상은 제품생산을 위한 시험성형 및 내구성 시험과정에서 약간의 형상변경을 거쳐 최종형상으로 완성된다.

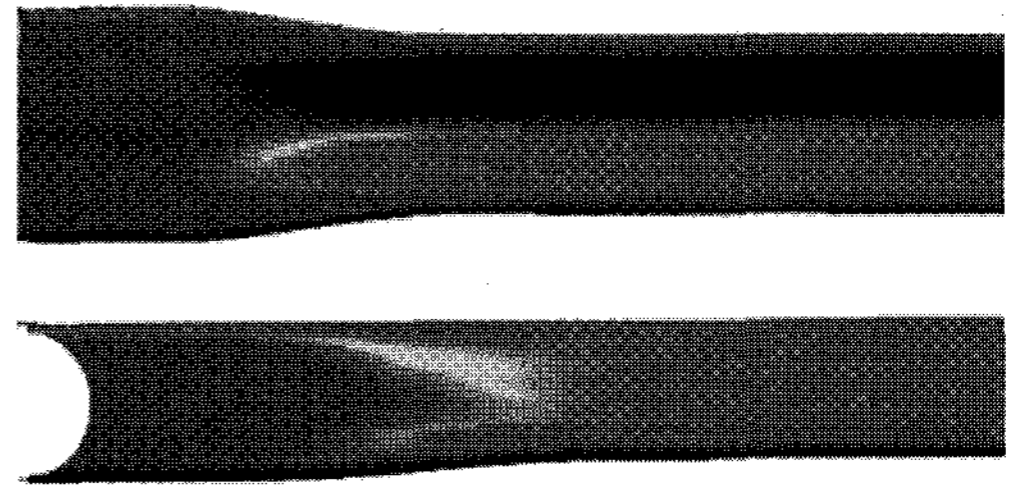


Fig. 3 Shape and dimensions of a CTBA with the initial design

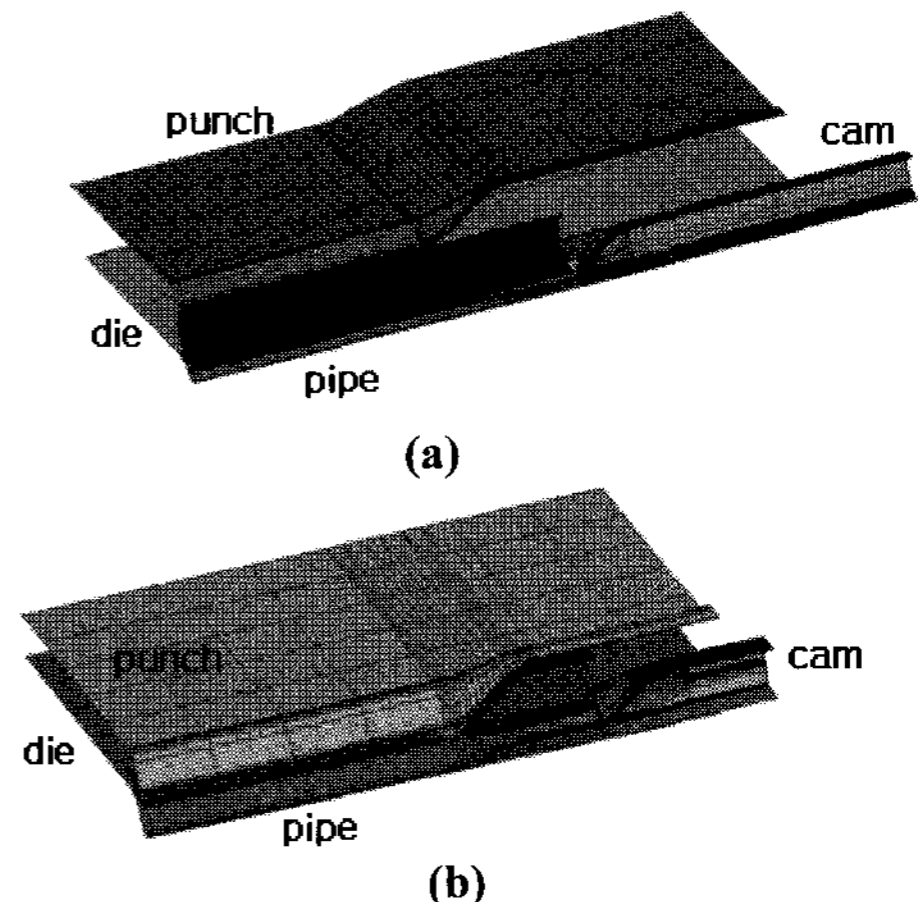


Fig. 4 Finite element model of the tube and the tools: (a) OP10 stage; (b) OP20 stage

2.2 초기설계안의 해석조건

튜브 프레스 성형공정에서 사용되는 원소재인 강관은 강도가 높으며, 경량화와 우수한 내구 및 피로성능을 동시에 얻기 위하여 성형성이 좋은 고장력강인 DP60강을 사용하고 있다. 튜브의 응력-변형률 곡선은 $\sigma = 1023.7(\epsilon^p + 0.00126)^{0.16}$ MPa로 표현되며, 원소재 외경은 90mm, 소재두께는 2.5mm이다. 튜브 프레스 성형공정용 금형은 상형(편치), 하형(다이), 캠으로 이루어져 있으며, 성형은 편치하강과 동시에 캠이 길이방향 안쪽으로 삽입되어 튜브의 함몰을 방지하면서 이루어진다.

해석은 상용유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D [6]를 이용하여 수행하였다. Fig. 4에 각 단계에서 튜브와 금형의 유한요소 모델을 도시하였다. 모델의 대칭성을 이용하여 1/4만 모델링하였다. 편치와 캠의 이동속도는 5m/s으로 하였고, 마찰계수는 무윤활을 가정하여 0.15로 하였다. 편의상 튜브 길이방향을 x축, 폭방향을 y축, 높이방향을 z축으로 설정하여 해석 및 분석을 실시하였다. Fig. 5에 도시한 바와 같이 튜브를 편의상 길이방향으로 3부분으로 분할하여 호칭을 사용하였다. 단면이 동일하고 장착 시 비틀림을 주로 받는 중심부위를 토션부(Torsion Region), 타 부품에 장착되는 부위를 끝부(End Region), 토션부와 끝부의 중간부위를 연결부(Intermediate Region)로 칭하도록 하였다. 이상의 조건을 바탕으로 각 단계의 성형해석을 수행하였으며, 변형상의 문제점을 파악하여 설계수정에 반영하도록 하였다.

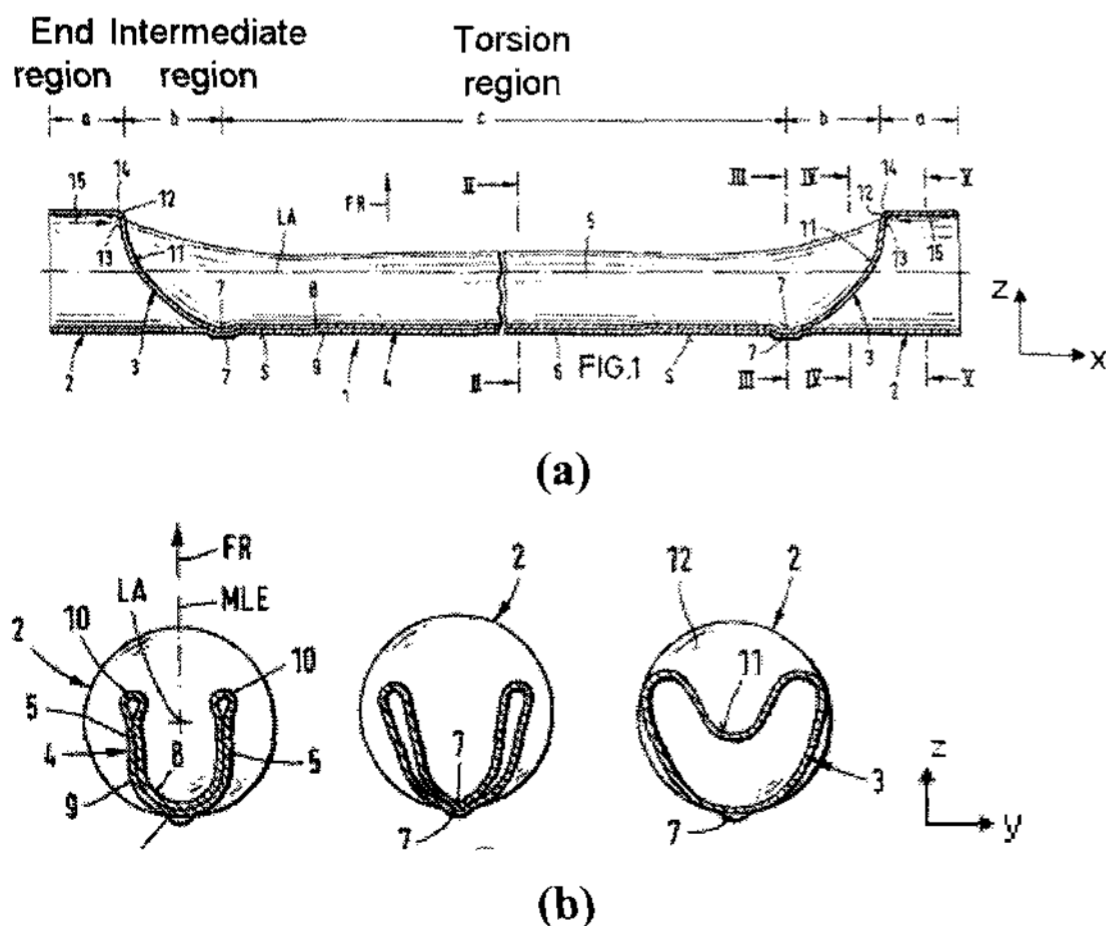


Fig. 5 Schematic shape of the CTBA[1]: (a) front view; (b) shape of cross sections

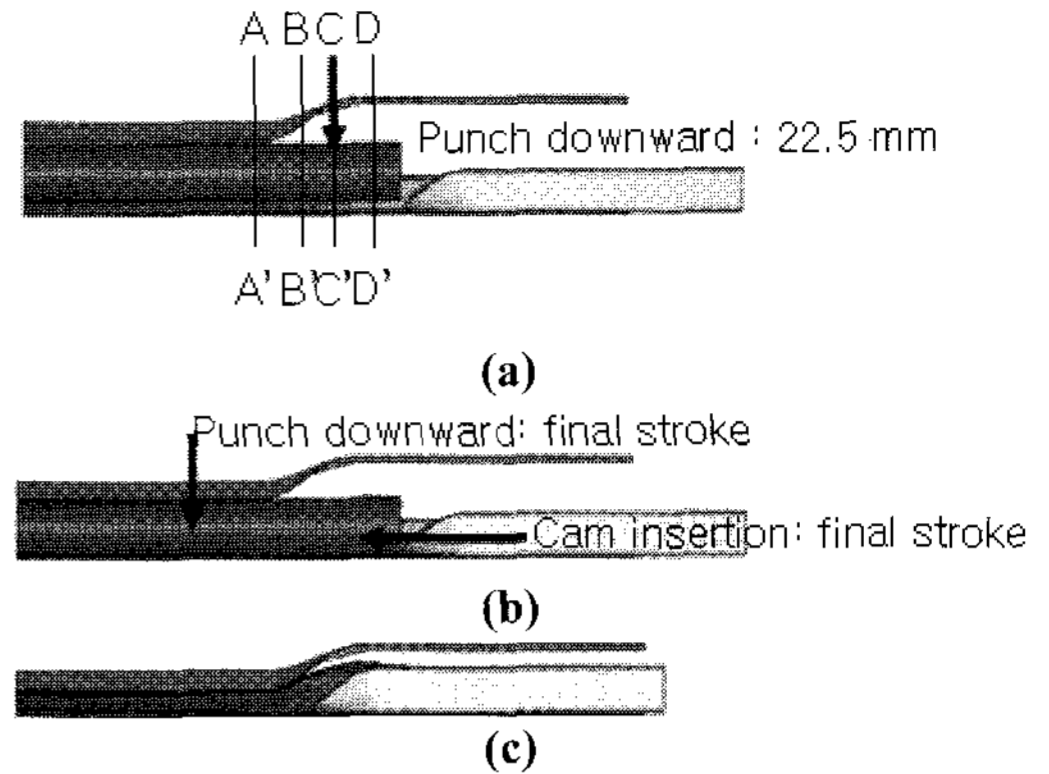


Fig. 6 Relative movement of the tools and the tube with the initial design during the OP10 process: (a) first punch forming process; (b) punch forming and cam inserting process; (c) final shape

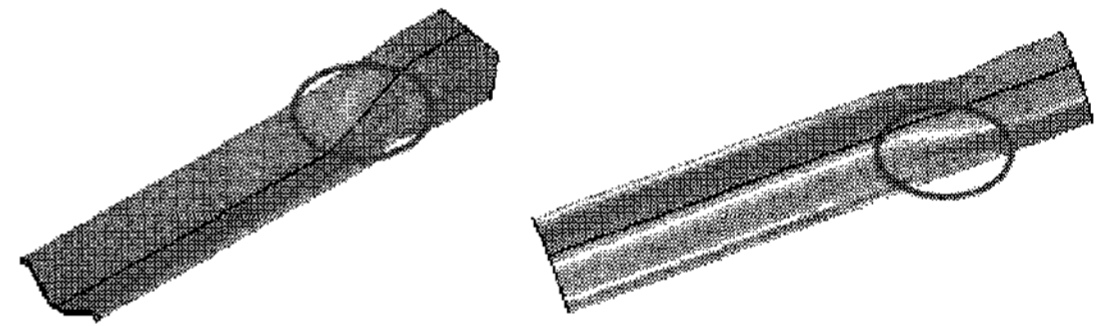


Fig. 7 Deformed shape of the tube with the initial design at OP10 stage

2.3 초기설계안의 해석결과

제1단계 성형공정에서는 편치와 캠의 상대운동을 다음과 같이 부과하였다. 먼저 편치를 하강하여 튜브를 하형에 안착시킨 후, 캠을 구동시켜 편치는 하강하며, 캠은 튜브 안쪽으로 이동하도록 하였다. 변형중인 튜브와 금형의 형상 및 튜브의 형상은 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에 도시한 바와 같이 편치와 캠간의 과도한 간격발생으로 연결부가 심하게 떠오르는 것을 볼 수 있다. 불량률의 원인을 파악하기 위하여 Fig. 6에 도시한 튜브 단면에서의 변형형상을 Fig. 8에 도시하였다. A-A' 단면은 토션부, B-B' 및 C-C' 단면은 연결부, D-D' 단면은 끝부이다. 그림에서 알 수 있듯이 캠이 효과적으로 튜브의 붕괴를 막지 못하는 문제점이 발생되어 연결부에서 튜브의 심한 찌그러짐이 발생하고 있다. Fig. 9에 연결부 단면에서 편치하강에 따른 순차적인 접촉 및 튜브 변형형상을 도시하였다. 금형 외부로 팽창된 튜브 최외곽면이 편치 하사점 이전에 상형에 접촉하고 역급

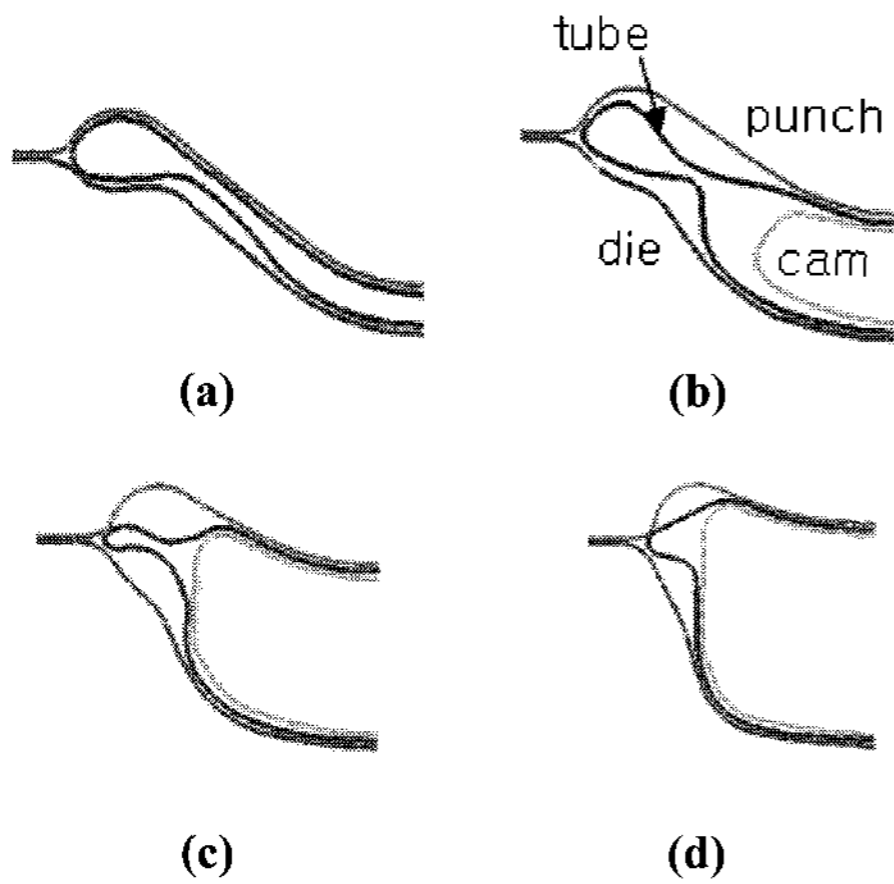


Fig. 8 Shape of cross sections of tools and the tube with the initial design after the OP10 stage: at sections (a) A-A'; (b) B-B'; (c) C-C'; (d) D-D'

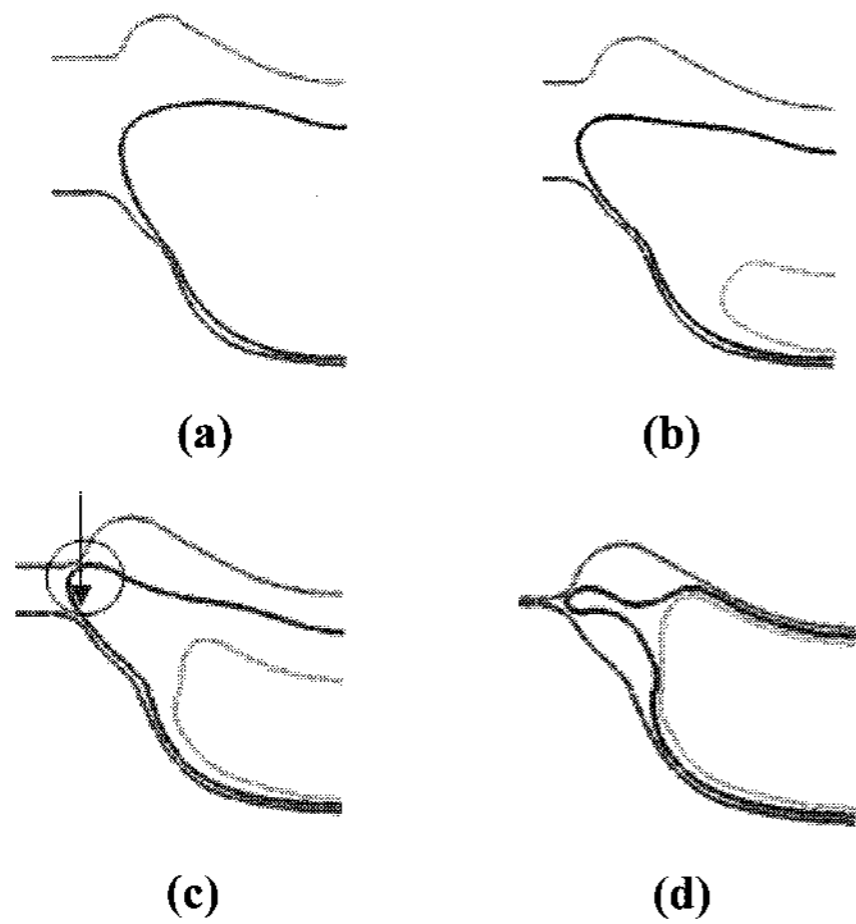


Fig. 9 Subsequent deformed shape of the cross section C-C' with the initial design during the OP10 stage: when punch strokes are (a) 77.1mm; (b) 89.8mm; (c) 100 mm; (d) final stroke

힘에 의하여 안쪽으로 함몰되는 현상으로 보이며, 성형 단면의 미확보 문제도 발생하였다. 제1단계 성형에서 얻은 튜브의 성형 데이터를 이용하여 제2단계 성형공정의 성형해석을 수행하였다. Fig. 10에 펀치 하강중의 금형과 튜브의 형상을 도시하였으며, 단면형상을 Fig. 11에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 토션부 및 연결부 대부분에서는 제1단계 공정에서 발생한 형상불량이 여전히 남아 있는 것을 알 수 있다. Fig. 12에는 최종

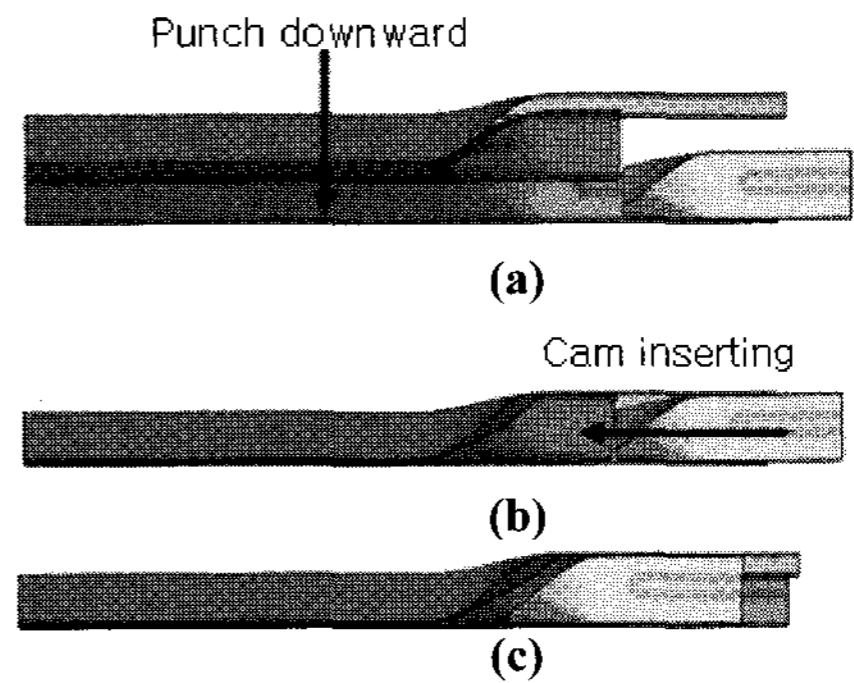


Fig.10 Relative movement of the tools and the tube with the initial design during the OP20 process: (a) punch forming process; (b) punch forming and cam inserting process; (c) final shape

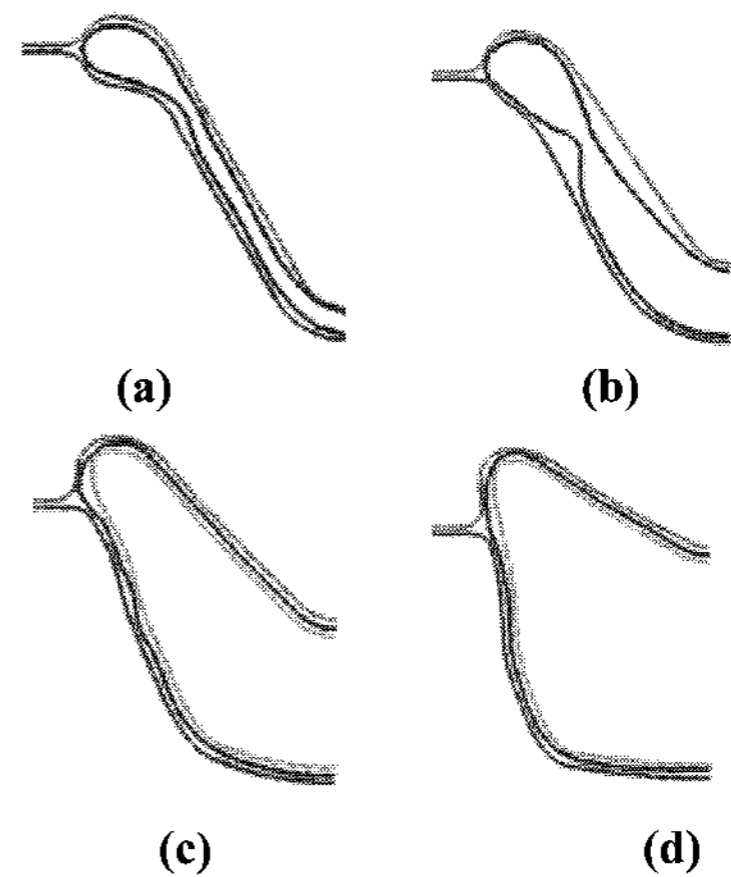


Fig.11 Shape of cross sections of tools and the tube with the initial design after the OP20 stage: at sections (a) A-A'; (b) B-B'; (c) C-C'; (d) D-D'

성형 후 튜브의 형상을 도시하였다. 연결부에서 형상불량이 발생하였고, 연결부 하면에서 좌굴현상이 발생하였다. Fig. 13에 단면 C-C'에서 펀치행정에 따른 순차적인 변형형상을 도시하였다. 제1단계 성형공정에서 발생한 국부 함몰 등의 형상불량은 펀치행정이 진행되어도 개선되지 않음을 알 수 있다.

초기설계안의 해석에서 나타난 설계상의 문제점은 크게 아래와 같이 구분할 수 있다.

- (1) 성형 초기 하형에 튜브 장착 시 튜브가 하면에 안착되지 못하여 펀치가 하강함과 동시에

하부로 이동하며 변형하므로 안정적인 성형이 어려움.

(2) 펀치가 튜브에 접촉하여 성형이 일어나는 순간 캠이 튜브 끝단에 충분히 삽입되어 있지 않아 중간부에 형상불량이 발생함.

(3) 펀치와 다이의 폭이 변형에 의하여 팽창된 튜브 외곽부분의 폭보다 좁아 성형중 접촉 및 역굽힘이 발생하여 토션부와 중간부 하단부에 형상 불량 발생함.

(4) 펀치와 다이 사이 공간 (cavity)이 튜브 단면 원주방향 길이에 비하여 협소하여 여유 발생 후 형상불량 발생함.

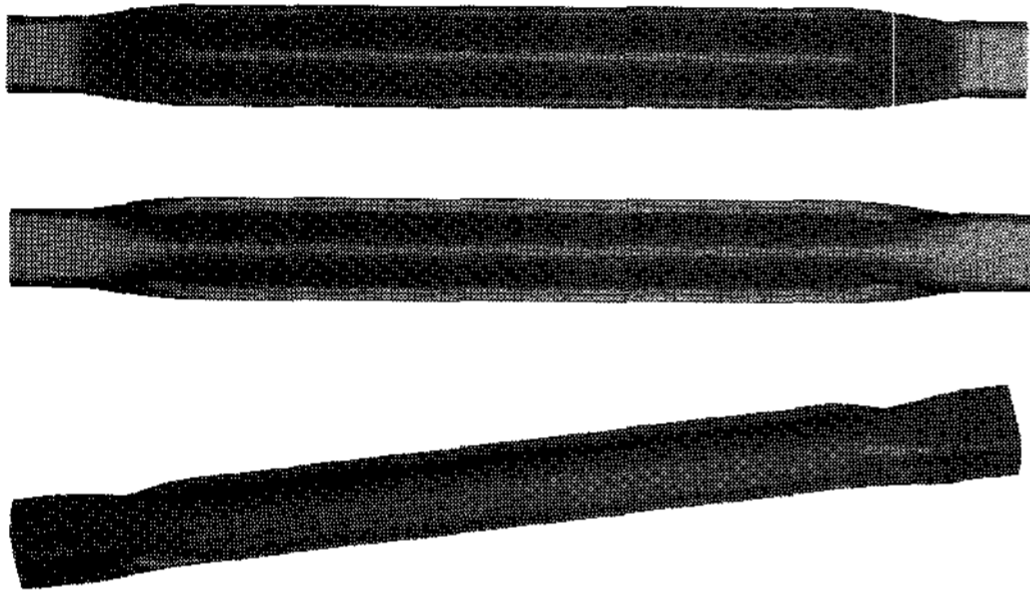


Fig. 12 Inferiorities in the final deformed shape with the initial design

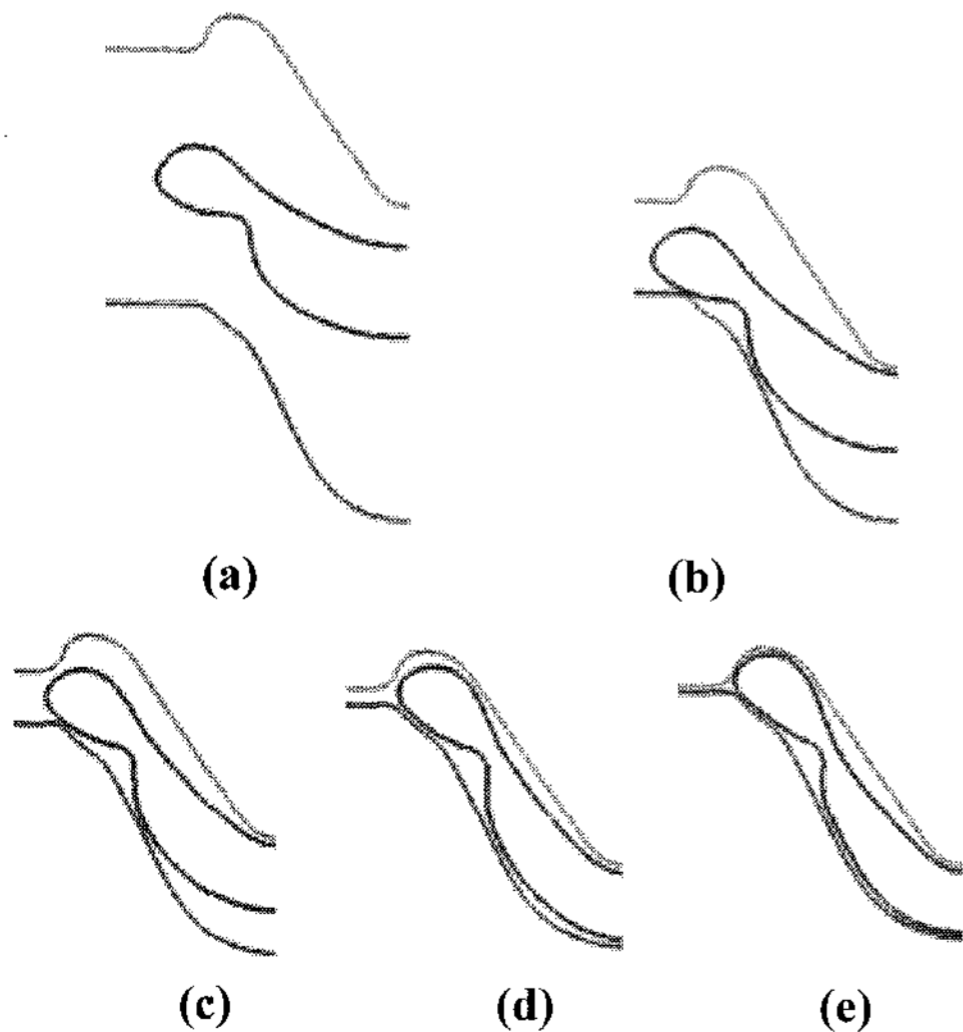


Fig.13 Subsequent deformed shape of cross sections B-B' with the initial design during the OP20 stage: when punch strokes are (a) initial stage; (b) 33.8mm; (c) 45.2mm; (d) 52.5mm

3. 수정 금형설계안 및 성형해석

기존의 연구에서는 2 단계로 금형을 제작하여 튜브를 양산하거나 스탬핑 공정과 하이드로포밍 공정을 같이 이용하여 제품을 생산하고 있으나, 금형 제작비용과 설비비 등의 원가상승 요인이 매우 커서 가격 경쟁력 측면에서 바람직하지 못한 단점이 있다. 본 연구에서는 기존 2 단계 설계안의 해석결과를 이용하여 성형공정을 1 단계로 축소시키는 방안을 제안하였고, 이를 설계에 반영한 후 해석에 적용하여 그 효용성을 입증하였다.

3.1 수정 금형설계안

1 단계만으로 성형을 수행하며 파악된 성형상의 문제점을 해결하기 위하여 다음과 같은 금형설계 변경안을 도출하였다.

(1) 다이의 옆면이 성형전에 폭 방향으로 벌어져 있다가 펀치하강과 동시에 안쪽으로 이동하여 패드 역할을 하게 한다. Fig. 14에 수정설계에서의 금형 및 튜브의 상호운동을 도시하였다. 펀치 성형과 타 금형부품과의 상대운동을 효과적으로 제어하기 위하여 캠을 사용하여 두 금형의 운동을 연동시켰다. 성형전에는 다이 옆면의 패드부가 폭 방향 바깥쪽으로 위치하고 있으므로 튜브가 바닥에 안착하게 되어 안정적인 성형이 가능할 것으로 예측되며, 성형중에는 패드가 폭방향 안쪽으로 이동하여 최종 제품의 폭을 치수에 맞게 성형할 수 있는 장점이 있다.

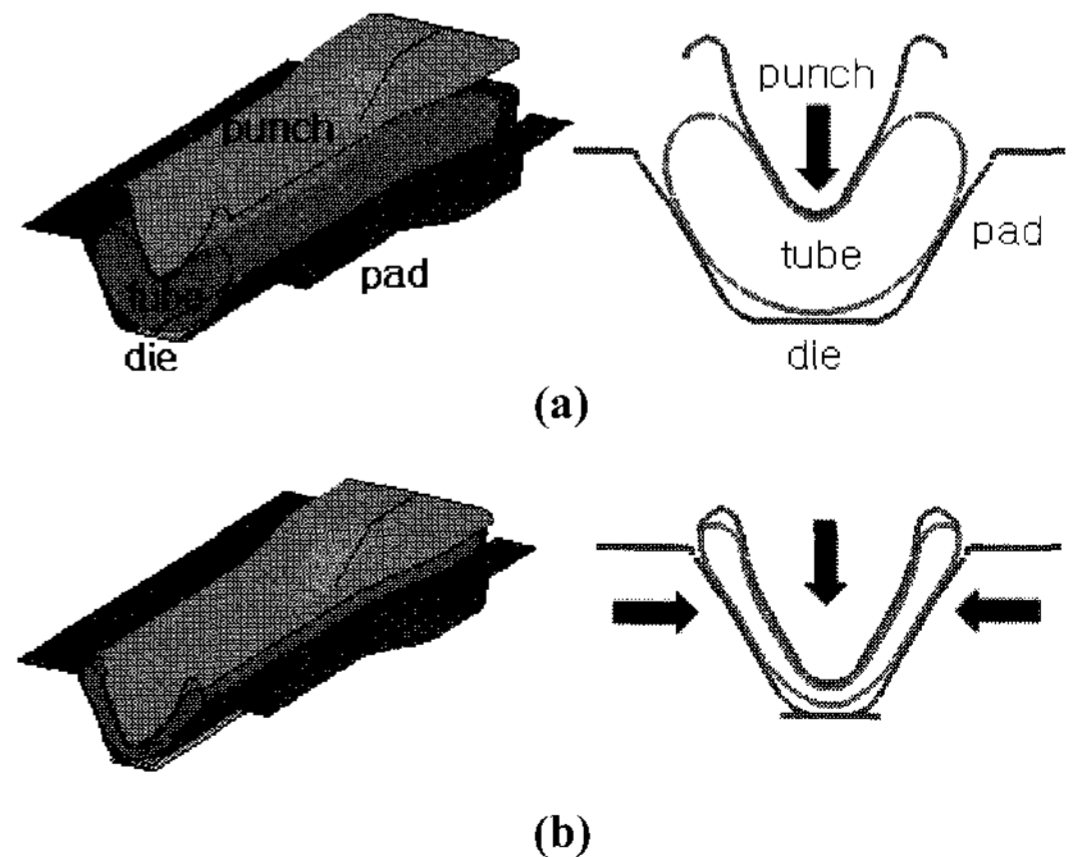


Fig.14 Schematic plan of the tool movement with the modified design: (a) movement of punch; (b) movement of punch and pad

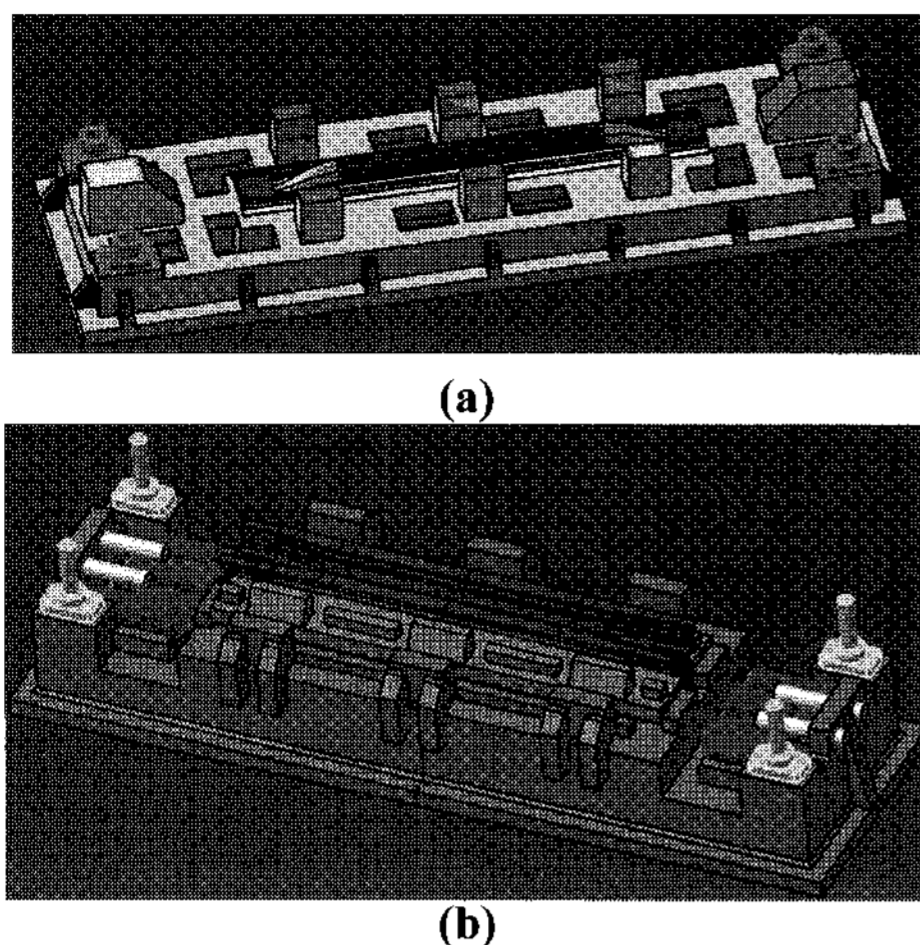


Fig.15 Schematic shape of the tools for the tubular CTBA: (a) upper die; (b) lower die

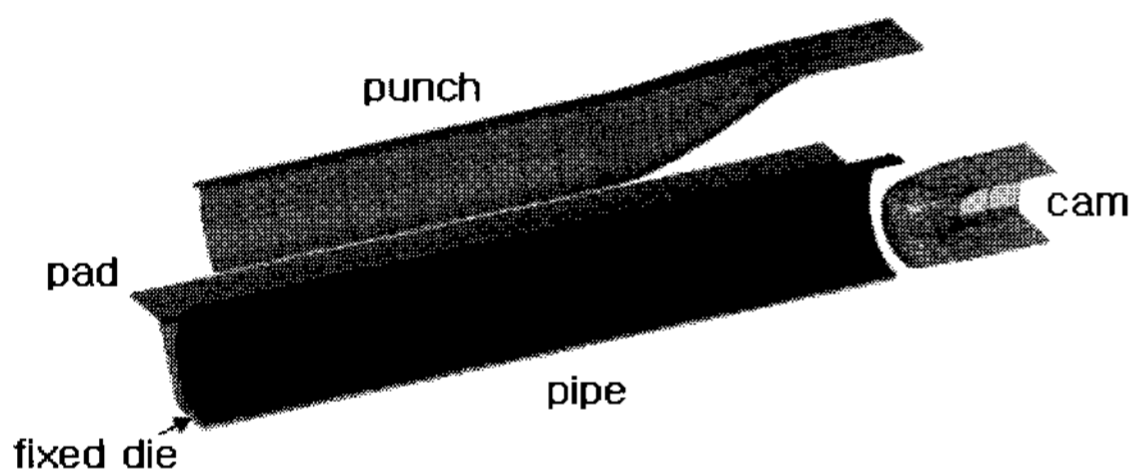


Fig.16 Finite element model of the tube and the tools with the modified design

(2) 캠의 운동도 펀치와 연동시켜서 펀치가 튜브에 닿기 이전에 캠이 일정부분 튜브 속으로 삽입되어 형상불량을 방지하도록 하였다.

(3) 펀치와 패드 외곽부의 폭을 증대시켜 사전 접촉 및 역굽힘, 변형공간 부족에 의한 여유발생 등을 방지하였다.

3.2 수정 금형설계안 해석

수정안에서 얻어진 금형의 형상을 Fig. 15 에 도시하였다. 금형은 상형(펀치), 하형(다이), 패드, 캠으로 이루어진다. 해석을 위하여 Fig. 16 에 도시한 바와 같이 유한요소 모델을 작성하였다. 각 금형의 운동은 Fig. 17 의 그래프와 같이 시간에 따라 속도를 부과하였으며, 실제 금형의 운동은 캠에 의하여 해석과 동일하게 제어된다. 펀치 행정에 따른 금형과 튜브의 형상은 Fig. 18 에 도시하였으며, 튜브의 변형형상은 Fig. 19 에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 기존의 설계안에서 발생하

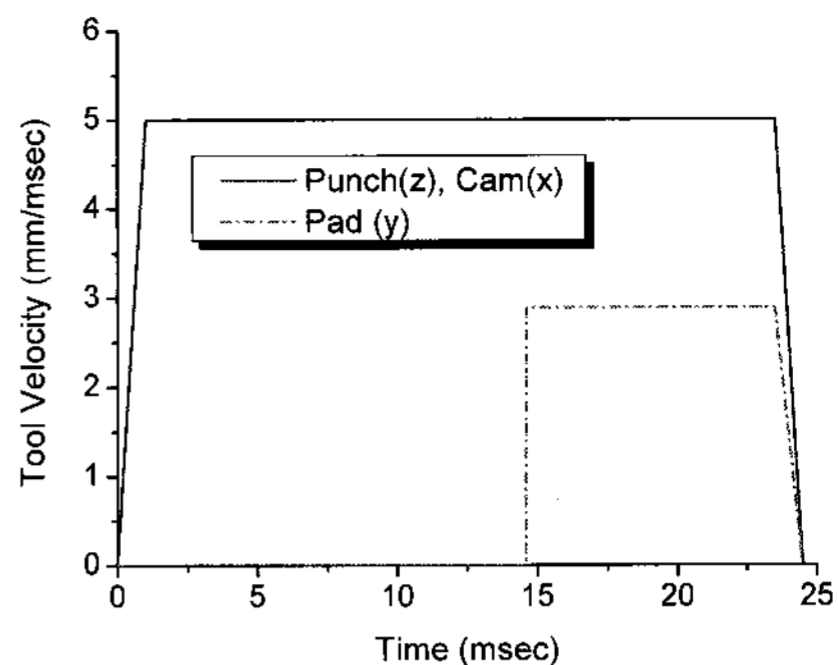


Fig.17 Velocity versus time curve imposed to tools with the modified design

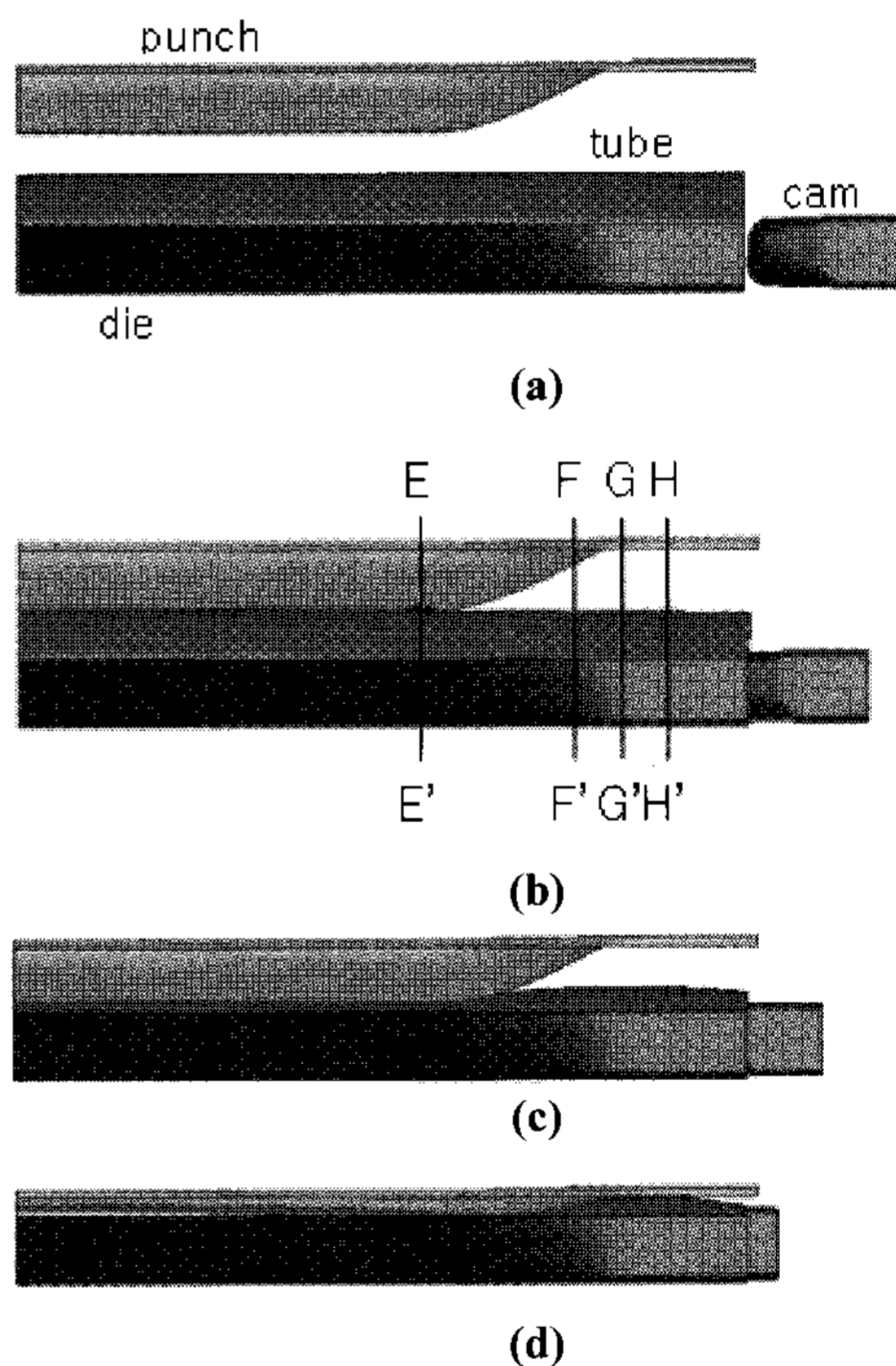


Fig.18 Subsequent deformed shapes of the tools and the tube with the modified design: (a) initial stage; (b) punch stroke = 32.6 mm; (c) punch stroke = 67.5 mm; (d) punch stroke=100.2mm

던 형상불량은 발생하지 않았으며, 안정적인 성형품이 얻어질 것으로 예측되었다. Fig. 20 에는 Fig. 18 에 도시한 튜브 단면부와 금형의 접촉 및 변형양상을 도시하였으며, 초기설계안보다 향상된 결과가 얻어진 것으로 판단된다. Fig. 21 에는 토션부 단면에서 펀치행정에 따른 접촉 및 변형조건에 변화에 대하여 추적하였으며 그림에서 보여 주듯

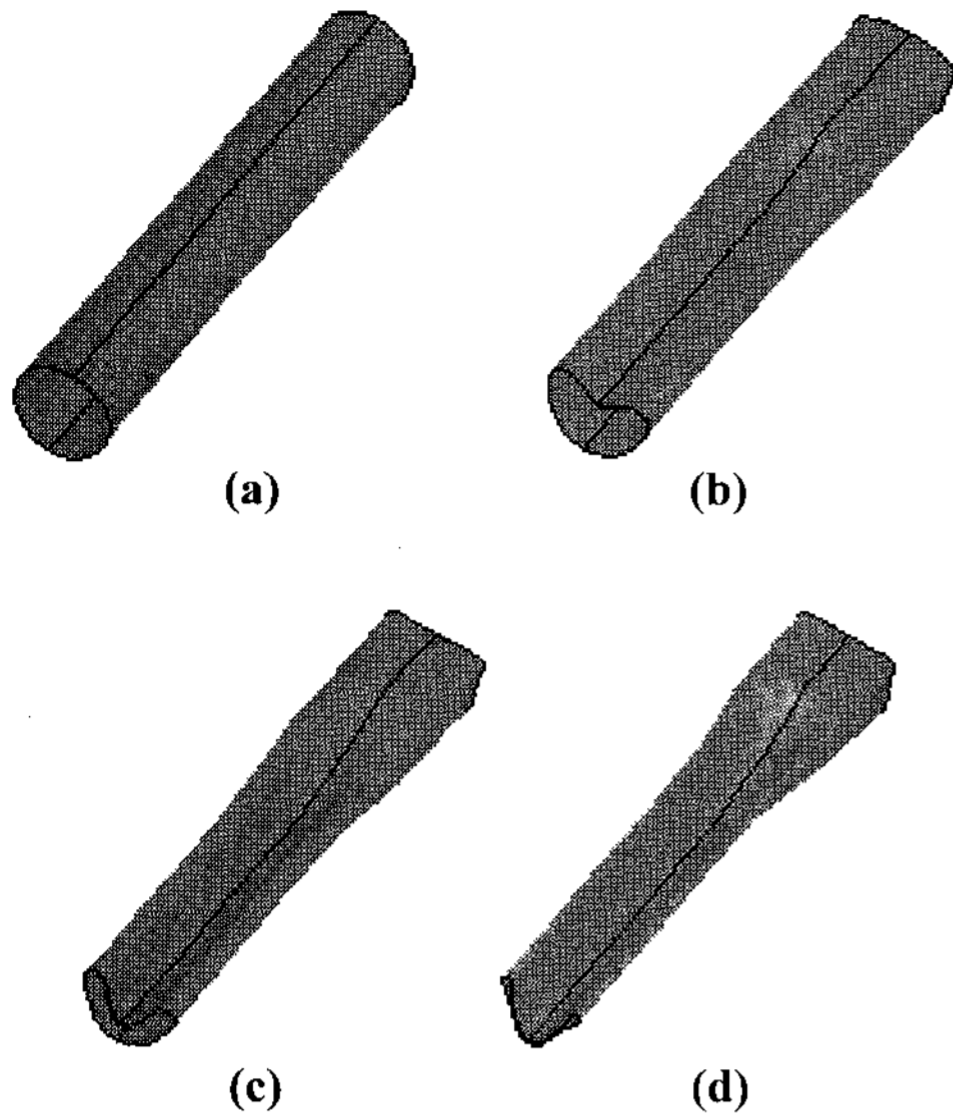


Fig.19 Subsequent deformed shapes of the tube with the modified design: (b) punch stroke = 32.6 mm; (c) punch stroke = 67.5mm; (d) punch stroke = 100.2mm; (e) final stroke

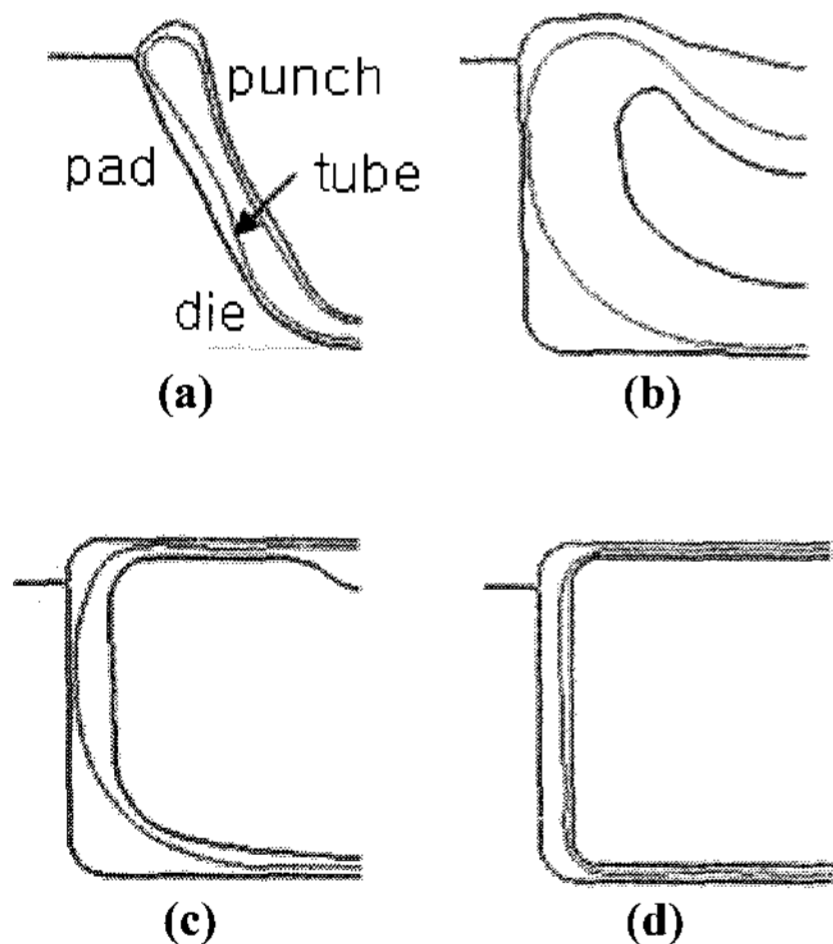


Fig.20 Shape of cross sections of tools and the tube with the modified design: at sections (a) E-E'; (b) F-F'; (c) G-G'; (d) H-H'

이 펀치-패드-캠의 연동에 의하여 형상불량 없는 단면이 성형된 것을 확인하였다.

이상의 해석결과로부터 제안된 최종설계안이 성형성의 문제점을 해결한 것으로 결론 내릴 수 있었다.

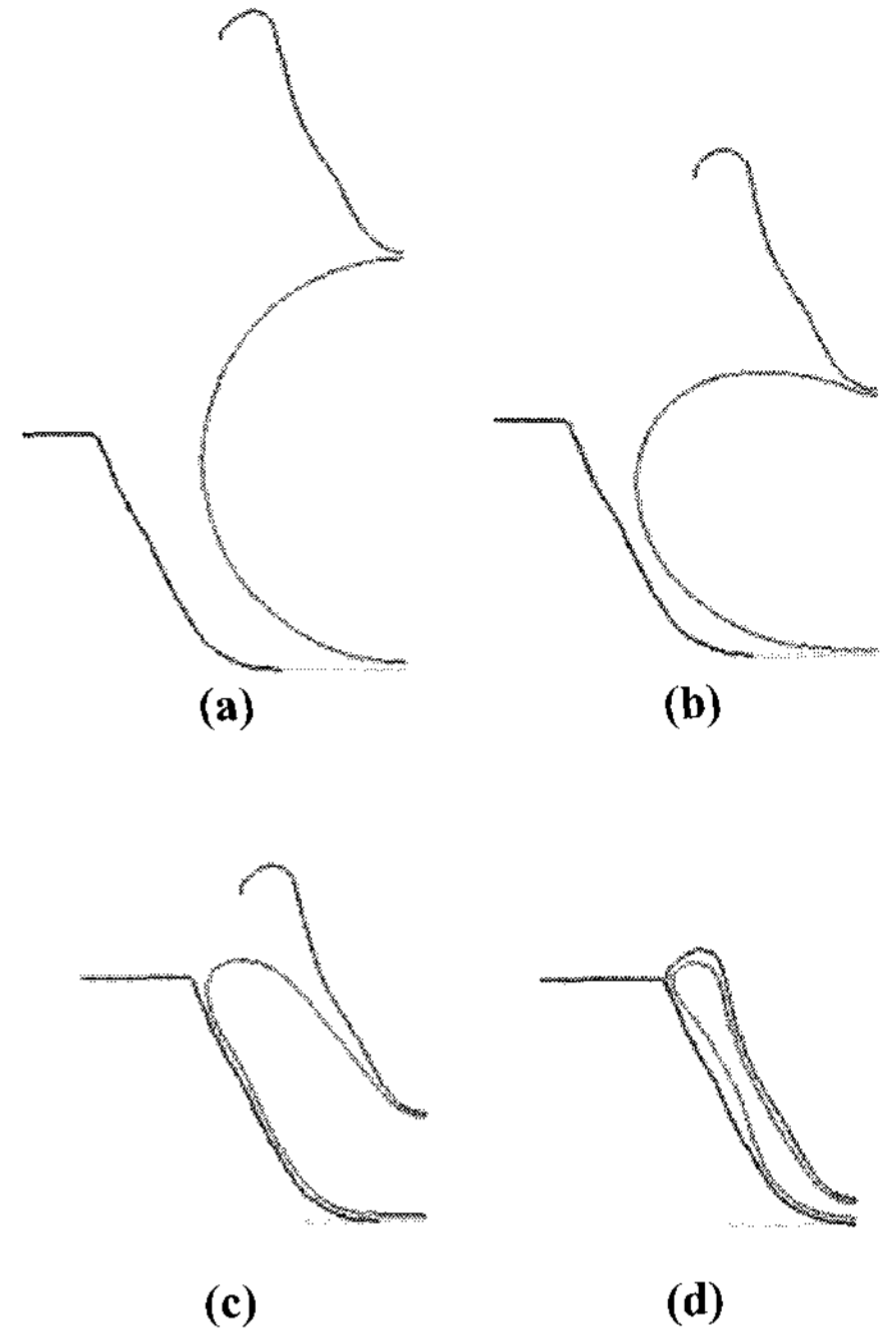


Fig.21 Subsequent deformed shape of the cross section E-E' with the modified design: (a) punch stroke=32.6mm; (b) punch stroke=67.5mm; (c) punch stroke=100.2mm; (d) final stroke

4. 금형 및 제품 제작

제 3 장의 해석결과를 바탕으로 튜브형 CTBA 의 금형설계를 수행하고 금형을 제작하였다. 제작된 금형으로 시험성형을 실시하고, 제작된 시제품을 이용하여 내구시험을 실시하여 내구성능을 만족함을 확인하였다.

4.1 금형제작

금형은 펀치(상형), 다이(하형), 패드, 캠으로 이루어져 있으며, 공정을 1 단계로 축소하여 성형하기 위하여 성형초기에는 패드가 폭방향으로 벌어져 있어 튜브가 금형 아랫면에 안착되도록 하며, 성형후기에는 패드가 폭방향 안쪽으로 이동하여 패딩 공정을 수행하도록 하였다. 펀치 이동 중에 패드와 캠의 운동을 구현하기 위하여 캠구조를 이용하여 상하 및 전후 운동이 가능하도록 하였다. Fig. 22 에는 시험용 유압 프레스에 조립된 금형의 형상을 보여주고 있다. 제작된 금형을 이용하여 시험성형을 수행하고 시제품을 제작하였다.

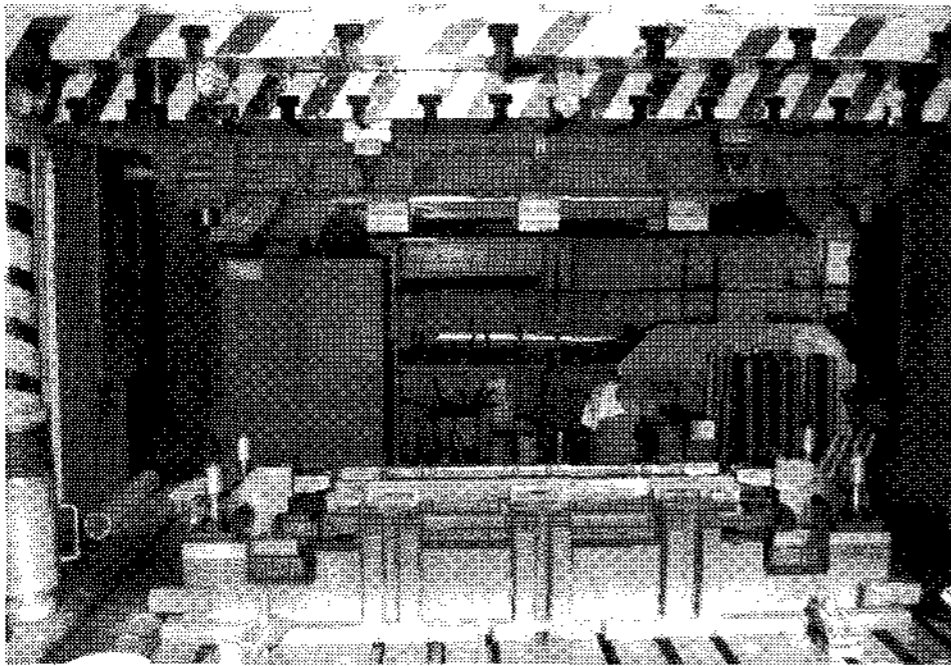
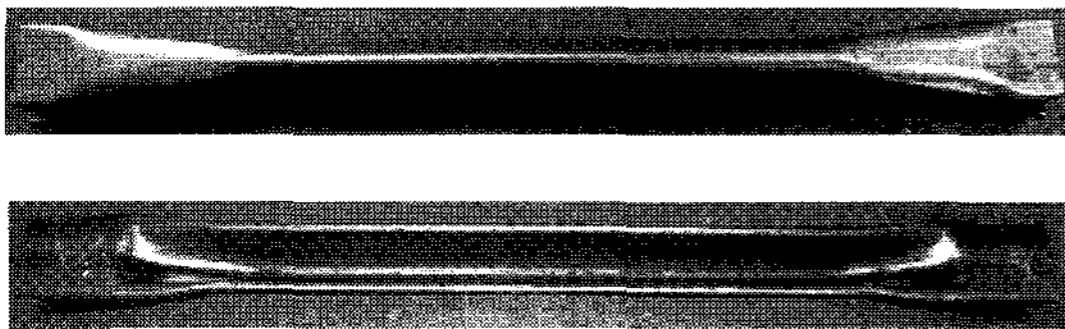
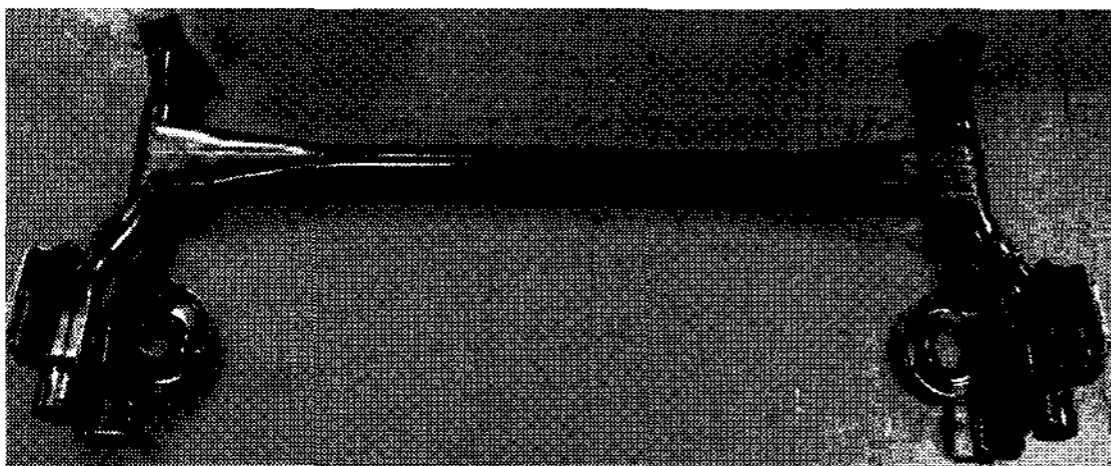


Fig.22 Schematic shape of assembled tool shapes and the hydraulic press



(a)



(b)

Fig.23 CTBA product and rear suspension assembly:
(a) formed product; (b) assembled rear suspension assembly

4.2 시제품 제작 및 시험

제작된 금형을 이용하여 Fig. 23과 같은 시제품을 생산하였으며, 후륜 현가장치에 조립하였다. 시제품을 단품 롤 내구시험을 수행하여 설계상의 문제점을 파악하였다. 롤 강성 및 내구시험은 4° 양륜 역상가진법으로 수행하였으며, 2Hz 주파수로 반복하중을 가하였다. 시험의 최소 만족 사양은 20만회를 하여 이를 넘으면 내구 성능을 만족하는 것으로 결정하였다. 설계된 제품이 롤 내구 성능을 만족함을 확인하였으며, 단축내구 시험을 실시하여 내구성능을 만족하는지를 확인하였다. X 방향의 단축내구 시험에서는 휠캐리어(Wheel carrier)에 10Hz의 주파수로 하중 $\pm 4.5\text{kN}$ 을 가하였으며, 내구사양

인 35만회를 만족하는지를 확인하였다. Y 방향의 단축내구 시험에서는 타이어 접촉점에 5Hz의 주파수로 하중 $\pm 2\text{kN}$ 을 가하였으며, 내구사양인 10만회를 만족하는지를 확인하였다. 시험결과 X, Y 방향의 단축내구 시험에서 모두 내구 사양을 만족하는 결과를 얻었다.

5. 결론

본 논문에서는 차체 후륜 현가장치의 주요 구조 부품인 CTBA의 일체화를 위한 신기술인 튜브 프레스 성형공정을 개발하기 위한 제품과 금형을 설계하였다. 설계안을 바탕으로 금형 및 제품을 제작하고 내구시험을 거쳐 제품이 실차에 장착가능함을 확인하였다. 본 논문에서 얻어진 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 초기설계안의 성형해석을 바탕으로 금형 수정안을 도출하였고 이를 검증하기 위한 성형해석을 수행하였다. 금형 운동에 대한 영향을 분석하였으며, 변형형상, 금형 및 튜브의 접촉 상태 등으로부터 설계안의 문제점을 파악하였다. 주요 문제점으로 성형초기 펀치와 튜브의 접촉 불균일, 캠의 삼입부족, 상하형 공간의 부족으로 인한 여유 발생 등이었으며 이를 바탕으로 수정설계안을 제시하고, 설계안이 이러한 문제점을 상당부분 해결하였음을 확인하였다.

(2) 기존의 연구에서 2 단계로 제작되던 부품을 1 단계 성형만으로 생산할 수 있도록 금형 최적화를 수행하였다. 펀치의 운동에 따라 캠 운동이 연동되도록 하였으며, 패드 부분이 안쪽으로 이동하여 패딩 공정을 추가하여 접촉 문제 및 형상 결함을 제거하였다. 이러한 설계안을 해석으로 검증하여 추후 금형 및 제품 설계를 수행하였다.

(3) 생산된 시제품을 후륜 현가장치에 장착하고 단품 롤 내구 시험 및 단축내구 시험을 수행한 결과 최종 설계에 의하여 제작된 제품이 시험 사양을 만족함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] R. Hansen, G. Wecker, 2000, Method of deforming an initial pipe having a circular cross-section into a U-shaped section and device for carrying out the method, US Patent 6119501.

- [2] H. Kossmeier, M. Kothenburger, W. Christophliemke, 2000, Transverse beam and method of manufacturing transverse beams, US Patent 6145271.
- [3] B. C. Park, T. W. Kwon, D. H. Lee, C. H. Suh, J. C. Kim, T. J. Kim, W. S. Lee, 2004, Development of rear chassis part using tube forming process, Proc. of KSTP 2004 Fall Conference, pp. 32~35.
- [4] H. T. Lim, I. S. Oh, J. M. Ko, H. Y. Kim, 2007, Tube hydroforming process design of torsion beam type rear suspension considering durability, Transactions of Materials Processing, Vol. 16, No. 4, pp. 201~209.
- [5] Porche Engineering Services Inc., 2001, ULSAB-AVC-PES Engineering Report.
- [6] LSTC, 2003, LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 970.