

# 회전 스웨이징을 이용한 자동차용 카울크로스바의 일체화 제조공정 개발

김홍석<sup>#</sup> · 윤재웅<sup>1</sup>

## Development of One-Piece Manufacturing Process for Automotive Cowl Cross Bar Using Rotary Swaging

H. S. Kim, J. W. Youn

(Received August 19, 2016 / Revised September 8, 2016 / Accepted September 23, 2016)

### Abstract

The automobile cowl cross bar which is a backbone frame part holding electrical and air conditioning components inside the cockpit module has been designed with more complex geometries recently due to demands of its enhanced functions and reduced weight of frame parts. The traditional manufacturing process using welding between tubes with different diameters shows several problems such as poor mechanical characteristics and appearance, etc. Therefore, in this study, one-piece manufacturing processes which can eliminate the welding process were developed by applying the rotary swaging process. CAE analyses were conducted to examine the feasibility of the process and prototypes were manufactured by using a rotary swaging machine with 4 split rotating dies and 12 head rollers. Bending tests of the manufactured prototypes confirmed that the rotary swaging process gives better mechanical properties comparing with the conventional processes.

**Key Words:** Cowl Cross Bar, One-piece Manufacturing Process, Rotary Swaging, Bending Test

## 1. 서 론

카울크로스바(cowl cross bar)는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 자동차 콕핏 모듈(cockpit module)의 주요 구성품으로서 차체의 비틀림이나 휘어짐을 감소시키기 위해 설치되는 프레임 부품이다. 과거 카울크로스바는 비교적 단순한 형상을 가지고 있어 단일 직경 파이프의 굽힘 공정으로 제조가 가능했으나 장착 부품의 다양화 및 소음·진동 특성의 개선, 차량 경량화의 요구 등에 따라 좌우의 직경이 서로 다른 제품들이 증가하고 있다. 기존에는 이러한 형상의 제조를 위해 서로 다른 직경의 파이프를 용접한 후

굽힘 성형하는 방식이 주로 사용되어 왔으나, 용접부의 균열 발생 및 기계적 특성의 저하, 용접 공정 추가에 따른 생산성 저하 및 비용 상승 등의 문제점을 안고 있어 용접에 따른 문제를 해소할 수 있는 일체화 성형공정(one-piece manufacturing process)의 개발이 요구되어 왔다.

이직경 파이프 제품의 일체화 성형을 위한 대표적인 공정으로 인발(drawing) 공정을 들 수 있는데, 맨드렐을 사용할 경우 직경 감소와 동시에 제품 두께를 효과적으로 제어할 수 있다[1]. 그러나, 본 연구의 대상이 되는 카울크로스바의 경우 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 대구경부 대비 소구경부의 단면

1. 대구대학교 기계공학부

<sup>#</sup> Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Daegu University, E-mail: kimkong@daegu.ac.kr

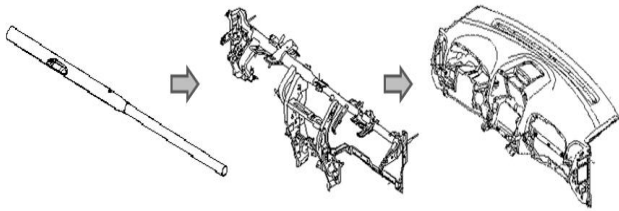


Fig. 1 The configuration of cockpit module with cowl cross bar

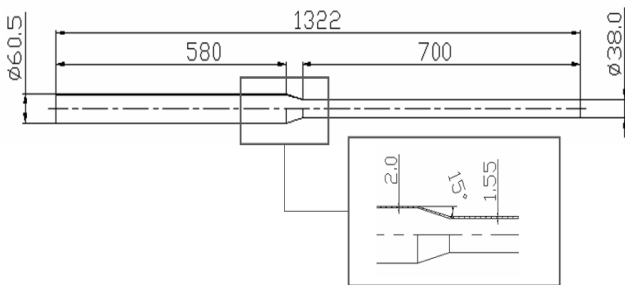


Fig. 2 The required geometrical specification of cowl cross bar

감소율이 51.7%로 비교적 크기 때문에 일반적인 인발 공정으로는 성형이 어렵다. 따라서 Kim 등[2]은 인장력만을 사용하는 전통적인 인발 공정 대신 소재 후면에 압축력을 추가적으로 인가하는 복합인발 공정(combined drawing process)의 적용을 통하여 카울크로스바의 일체화 성형공정을 개발한 바 있다. 그러나 개발된 공정은 인발 공정의 특성을 가지고 있어 소재와 금형 간의 마찰을 줄이기 위한 윤활피막 처리가 요구되었는데, 기존 용접공정에서는 불필요했던 피막 처리의 추가로 생산단가가 기존 공정보다 증가되어 현실적인 대안으로 채용되기에는 어려움이 있는 것으로 판단되었다.

파이프의 직경을 감소시키며 두께를 제어할 수 있는 또 다른 성형법으로서 회전하는 다수 개의 금형이 반경 방향으로 왕복 운동하며 소재에 압축력을 가하는 회전 스웨이징(rotary swaging) 공정[3]을 고려할 수 있다. 일반적으로 회전 스웨이징 공정은 인발 공정에 비해 공정 속도가 다소 느리지만 보다 큰 단면감소율을 갖는 성형이 가능하며 제품의 형상 변화에 보다 용이하게 대응할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 카울크로스바의 일체화 성형을 위하여 회전 스웨이징 공정을 적용하고자 한다.

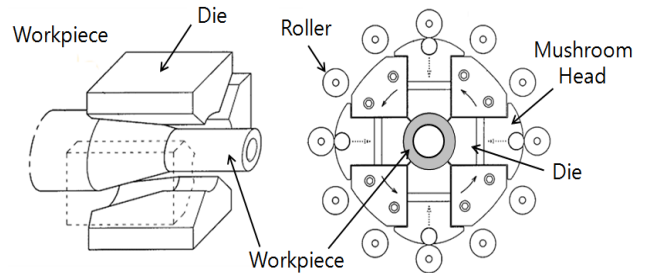


Fig. 3 Schematic diagram of swaging process

## 2. CAE 해석을 이용한 공정 검증

### 2.1 회전 스웨이징 공정

회전 스웨이징은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 회전하며 반경 방향으로 왕복 운동하는 다수 개의 금형으로 봉재나 관재의 직경을 줄이는 점진 성형(incremental forging) 공정의 일종으로서 다이 외측에 설치된 롤러를 이용하여 금형의 반복 타격 움직임을 제어하게 된다. 일반적으로 스웨이징 공정을 이용하면 우수한 표면 정도와 기계적 성질, 치수정밀도를 갖는 제품을 금형의 교체 없이 얻을 수 있다는 장점이 있다[4]. 또한 인발 공정의 경우 소재와 금형 간에 접촉 상대운동이 광범위하게 발생하지만 스웨이징 공정에서는 금형과 소재의 접촉 시간이 짧아 마찰의 영향이 상대적으로 작아 별도의 윤활 피막처리 없이 액상 윤활유를 사용하는 것이 일반적이다[5]. 본 연구에서는 이러한 스웨이징 공정을 카울크로스바 성형에 적용할 경우 발생할 수 있는 문제점 파악을 위하여 DEFORM-3D(ver.10.2)를 이용한 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

### 2.2 무맨드렐 단순 스웨이징 해석

직경 감소부의 두께 제어를 위해서는 파이프 내측에 맨드렐의 설치가 필요하지만 본 연구에서는 스웨이징 공정에서 맨드렐의 역할을 알아보기 위하여 맨드렐을 사용하지 않는 단순 스웨이징 공정에 대한 CAE 해석을 수행해 보았다. 해석에 사용된 모델은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 초기 소재와 초기 소재를 축 방향으로 지지하는 블로커(blocker), 그리고 회전하며 반경 방향으로 소재를 타격하는 4개의 금형으로 구성되었다. 초기 소재의 외경과 두께는 Fig. 2에 나타난 최종 제품의 대구경부와 동일하게 각각 60.5mm와 2.0mm로 설정되었으나 소재의 변형이 정상 상태에 도달하면 동일한 유형의 성형이 반

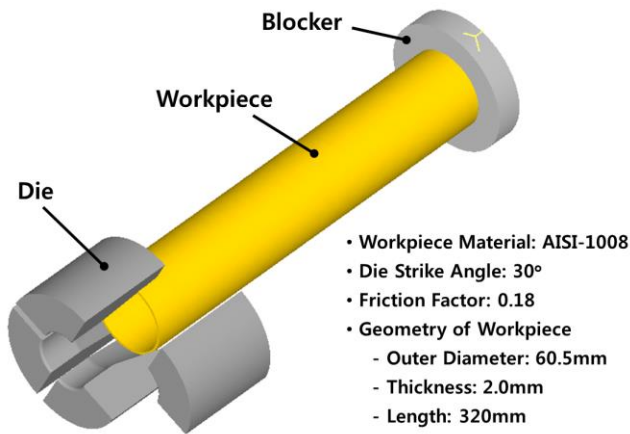


Fig. 4 Geometric model of CAE analysis for swaging without mandrel

복되므로[6] 초기 소재의 길이는 실제 제품에서 소요되는 것보다 작은 320mm로 설정하였다. 또한, Fig. 3에 나타낸 12개의 롤러를 사용하는 스웨이징 공정을 모사하기 위해 각 타격 시 금형을 반시계 방향으로 30°씩 회전시켰으며, 각 타격 당 소재 전진량은 2.5mm로 설정하였다. 소재의 재질은 기존 용접 공정 및 복합인발공정에서와 동일하게 AISI-1008을 사용하였으며, 윤활피막처리 미적용 소재에 액상 윤활유를 사용하는 마찰 조건을 고려하여 마찰상수( $\mu$ )를 0.18로 설정하였다. 그러나, 소재 단부의 경우 단순 절단 및 무윤활 조건으로서 마찰상수는 일반적인 냉간단조공정에 비해 상대적으로 큰 수치인 0.5로 설정하였다.

설정된 공정 조건을 이용하여 예측된 변형 형상을 Fig. 5에 나타내었는데, 그림에는 소재의 형상 변화를 명확히 표현하기 위해 4개의 금형 중 1개만을 도시하였다. 소구경부가 약 91mm 형성될 때까지 해석을 반복 수행하였는데, 소재 선단부가 금형을 완전히 벗어나 소재 변형이 정상상태에 도달하였다고 판단하였다. CAE 해석으로 예측된 최종성형 상태의 유효변형률과 유효응력을 Fig. 6에 나타내었는데, 유효변형률의 최대값은 1.88로서 변형률 수치가 전반적으로 그리 높지 않고 금형 타격 부위에 변형이 집중됨을 알 수 있었다. 또한, 유효응력은 금형에 의해 형상이 변화하는 직경 변화 구간에서 607MPa의 최대값이 형성되었는데, 열처리된 공구강을 금형 소재로 사용할 경우 금형 파손의 위험은 높지 않다고 판단하였다. 그러나, Fig. 7에 나타낸 바와 같이

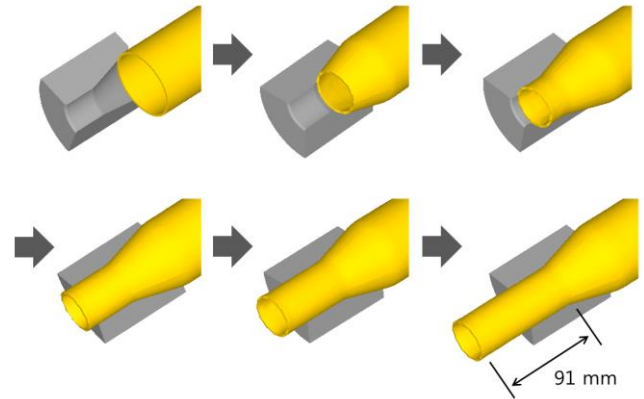


Fig. 5 Deformed geometries obtained by CAE analysis

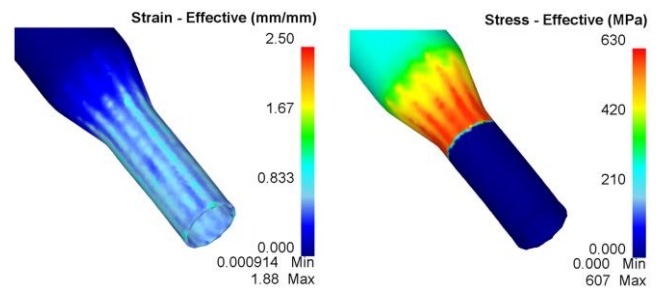


Fig. 6 Distributions of effective strain and effective stress predicted by CAE analysis

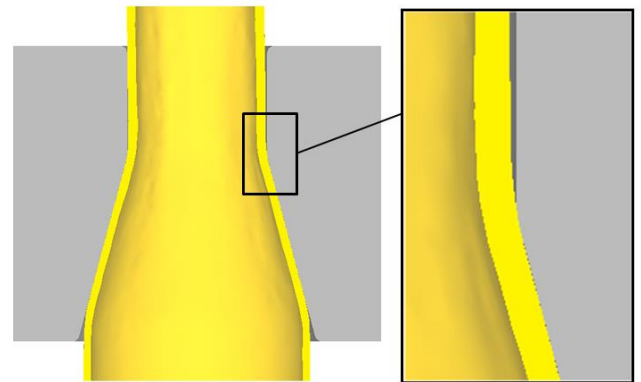


Fig. 7 The cross-sectional geometry of the diameter reduced region

직경이 감소하며 내경 방향의 소재 흐름이 발생하여 변형 소재가 외경측의 금형면에서 이탈하여 지정된 외경 치수를 만족하지 못하며, 두께도 증가함을 알 수 있었다. CAE 해석으로 예측된 변형 후 소구경부의 두께는 2.3~2.5mm 범위에서 불규칙적으로 형성되며, 따라서 맨드렐을 사용하지 않을 경우 지정된 치수 기준을 만족할 수 없다고 판단하였다.

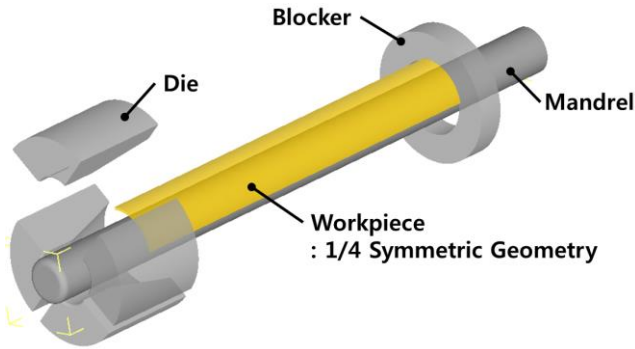


Fig. 8 Rotational-symmetric model of CAE analysis for swaging process with mandrel

### 2.3 맨드렐 적용 회전대칭 해석

소구경부의 두께가 1.55mm로서 초기 소재의 두께 2.0mm보다 작은 본 제품의 경우 전절에서 고찰한 바와 같이 치수정밀도를 확보하기 위하여 맨드렐의 적용이 불가피한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 맨드렐을 사용하는 스웨이징 공정에 대한 해석을 수행하였는데 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 전체 소재의 1/4 만을 해석하였다. 일부 연구에서는 튜브 형상 제품에 대해 축대칭 조건을 적용하여 스웨이징 공정을 2차원 문제로 모사한 사례도 있었으나[7] 본 연구에서는 일반 3차원 해석보다 해석이 효과적이며 원주 방향의 소재 유동을 고려할 수 있는 특정 각도 기준의 회전대칭 조건을 적용하였다. 본 연구에서는 소재의 각 1/4 절단면에 대해 원주 방향으로 변위 구속되는 회전대칭 조건을 설정하였으며, 금형과 맨드렐, 블로커는 전체 모델을 사용하였다. 이때, 회전대칭 적용을 제외한 금형 회전각도나 소재 전진량, 소재와 금형 간 마찰상수 등의 공정 변수는 전절에서의 해석과 동일하게 설정하였다.

맨드렐이 설치된 1/4 회전대칭 해석을 통하여 얻어진 소재의 변형 형상을 Fig. 9에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 설치된 맨드렐을 추종하는 소재의 흐름이 형성되어 외경측 성형이 무리 없이 이루어짐을 알 수 있었다. 또한, 성형 종료 시점의 소재 단면 형상을 Fig. 10에 나타내었는데, 소재 내부에 설치된 맨드렐에 의해 내경 방향 흐름이 저지되며, 금형과 맨드렐의 간격에 의해 두께가 결정됨을 확인할 수 있었다. 또한 맨드렐을 사용할 경우 Fig. 7에 나타내었던 직경감소부 외경측의 금형면 이탈 현상도 방지할 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 10의 'A'로 표시된 선단부 9.4mm 구간을 제외하면 성형

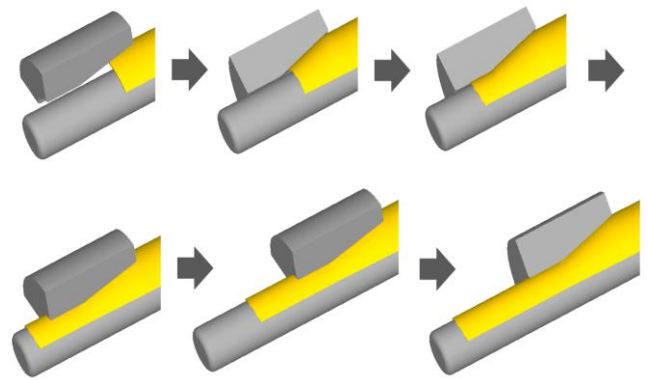


Fig. 9 Deformed geometries obtained by CAE analysis using mandrel

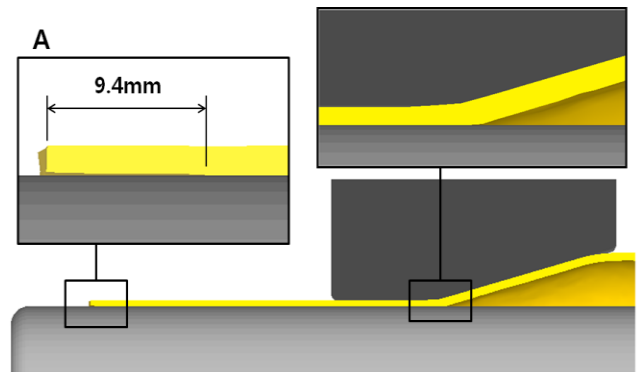


Fig.10 The cross-sectional geometry after the rotary swaging process using mandrel

후 소구경부의 두께는 1.52~1.55mm로서 맨드렐을 사용하여 치수정밀도를 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 이때, 소재 최종단부의 두께는 1.39mm로서 최초 성형 시에 얇은 두께로 성형되어 점진적으로 밀려나가는 양상을 띄는데, 실제 공정의 후처리시 종단부 10~20mm 구간은 절단되기 때문에 문제가 되지 않을 것으로 판단하였다.

최종 성형 상태에서의 유효변형률 및 유효응력 분포를 Fig. 11에 나타내었는데, 맨드렐이 사용되지 않았던 Fig. 6과 비교하면 전반적으로 수치가 증가하였고 수치 증가 영역도 넓어졌음을 알 수 있다. 이는 맨드렐에 의해 소구경부 전반에 대해 두께 방향의 압축이 이루어졌고 소재가 금형에서 이탈하지 않고 지속적인 압축력을 받았기 때문인 것으로 보인다. 그러나 예측된 유효변형률 및 유효응력의 크기를 고려할 때 성형 결함은 발생하지 않을 것으로 판단하였다.

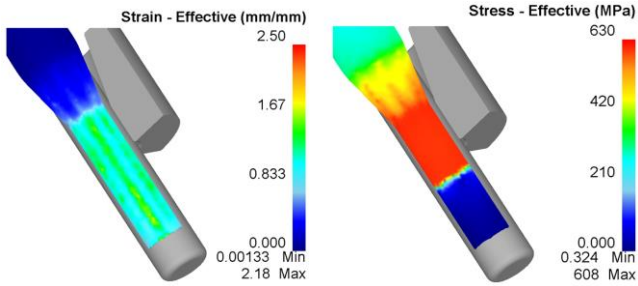


Fig.11 Distributions of effective strain and effective stress of rotary swaging using mandrel

### 3. 시제품 제작 및 검토

카울크로스바의 성형을 위해 사용된 스웨이징 장치를 Fig. 12에 나타내었는데, 해석 시 고려된 조건과 동일하게 12개의 헤드롤러와 4개의 금형이 사용되었다. 제작된 스웨이징 장치를 이용하여 수행된 성형 실험에서 얻어진 시제품의 직경 변화부를 용접 제품과 비교하여 Fig. 13에 나타내었는데, 스웨이징 공정을 이용하여 우수한 외관과 허용 정밀도를 만족하는 일체화 성형이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 본 논문에서는 용접 및 복합인발, 스웨이징 공정에 따른 제품의 기계적 특성 비교를 위하여 Fig. 14에 나타낸 바와 같이 제품의 직경 변화부를 편치로 가압하는 굽힘 시험을 실시하였다. 측정된 최대굽힘강도를 Table 1에 나타내었는데, 일체화 성형공정인 복합인발과 스웨이징 시제품의 굽힘 강도가 용접 제품에 비해 높음을 확인할 수 있었다. 또한, 스웨이징 시제품이 복합인발 시제품에 비하여 높은 굽힘 강도를 보임을 알 수 있었는데, 복합인발 공정에서는 인장 위주의 성형이 이루어지는 반면 스웨이징 공정에서는 압축 위주의 성형이 이루어져 보다 치밀한 조직이 형성되었기 때문인 것으로 추측된다.

이상과 같이 시제품에 대한 굽힘 시험을 통하여 스웨이징 공정으로 성형된 시제품이 용접 또는 복합인발 공정으로 제작된 시제품에 비해 높은 굽힘 강도를 확보하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 스웨이징 공정에서는 별도의 윤활피막처리가 필요하지 않기 때문에 기존 용접공정에 비해 생산비용 절감 효과도 거둘 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 성과에도 불구하고 본 연구는 스웨이징 공정의 중요 변수인 단면감소율 및 소재 이송속도

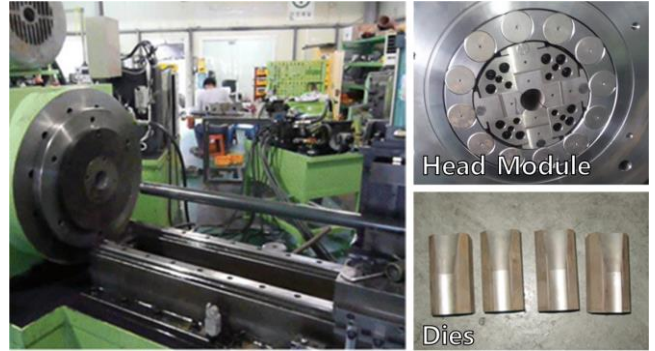


Fig.12 The head module and dies of the rotary swaging machine for manufacturing prototypes

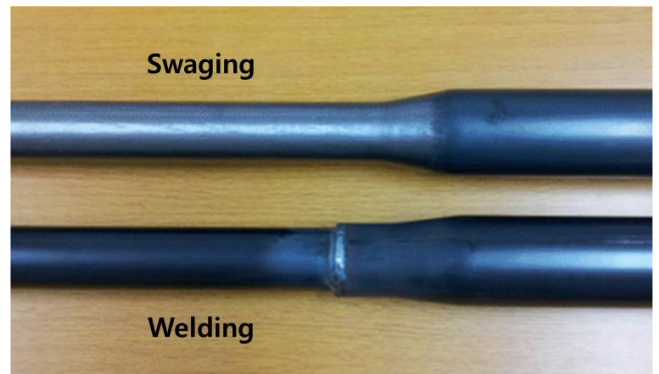


Fig.13 Prototypes of cowl cross bar manufactured by applying swaging and welding process

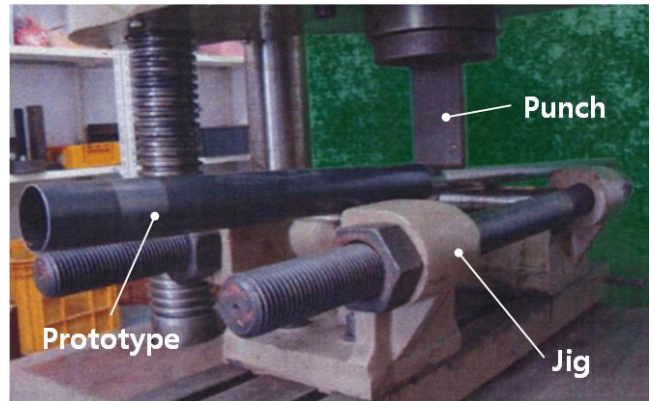


Fig.14 Configuration of bending test for cowl cross bars

Table 1 The maximum bending strengths obtained by bending tests

Process	Max. Bending Strength(N/mm <sup>2</sup> )
Welding	35.1
Combined Drawing	44.2
Swaging	57.1

에 대한 체계적 분석을 수행하지 못했다는 한계를 갖는다. 공정의 속성 상 보다 큰 단면감소율을 갖는 제품의 성형이 가능할 것으로 판단되는데, 소재 두께 및 소재 이송속도에 따른 성형 한계에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 자동차용 카울크로스바의 일체화 성형을 위하여 스웨이징 공정을 적용하였고, 이를 위하여 CAE 해석 및 시제품 제작을 수행하였다. 이러한 일련의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 스웨이징 공정의 CAE 해석 결과 맨드렐을 사용하지 않을 경우 축관 부위의 두께 및 편차 증가로 인해 직경과 두께가 동시에 감소해야 하는 카울크로스바의 형상 조건을 만족시킬 수 없다.

(2) 맨드렐을 사용할 경우 12개의 헤드롤러와 4개의 금형을 사용한 스웨이징 공정을 통하여 단면 감소율이 51.7%인 축관 형상의 결함 없는 성형이 가능함을 확인할 수 있었다.

(3) 스웨이징 공정을 이용하여 기존 용접 및 복합인발 공정에 비해 우수한 기계적 강도를 갖는 제품의 제조가 가능하며, 초기 소재에 대한 윤활피막처리가 불필요하기 때문에 스웨이징 공정은 자동차용 카울크로스바의 일체화 성형에 현실적인 대안으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 대구대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] S. W. Kim, Y. N. Kwon, Y. S. Lee, J. H. Lee, 2007, Design of Mandrel in Tube Drawing Process for Automotive Steering Input Shaft, J. Mater. Process. Technol., Vol. 187-188, pp. 182~186.
- [2] H. S. Kim, J. W. Youn, 2009, A Study on Development of Combined Drawing Process for Automotive Cowl Cross Bar with Variable Diameters, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 7, pp. 538~543.
- [3] E. P. DeGarmo, J. T. Black, R. A. Kohser, 1990, Materials and Processes in Manufacturing, Macmillan Publishing Co., New York, pp. 443~445.
- [4] Q. Zhang, K. Jin, D. Mu, P. Ma, J. Tian, 2014, Rotary Swaging Forming Process of Tube Workpiece, Procedia Eng., Vol. 81, pp. 2336~2341.
- [5] M. Herrmann, C. Schenck, B. Kuhfuss, 2016, Dry Rotary Swaging with Structured Tools, Procedia CIRP, Vol. 40, pp. 653~658.
- [6] A. Piela, F. Grosman, 1996, Spatial Modeling of Swaging Process Using Finite Element Method Applied to Axially-Symmetrical Problems, J. Mater. Process. Technol., Vol. 60, No. 1, pp. 517~522.
- [7] E. Mouri, S. Ishkina, B. Kuhfuss, T. Hochrainer, A. Struss, M. Hunkel, 2014, 2D-Simulation of Material Flow During Infeed Rotary Swaging Using Finite Element Method, Procedia Eng., Vol. 81, pp. 2342~2347.