

## 유동성형을 이용한 중공형 부품 제조공정 개발

권용남<sup>#</sup> · 김상우<sup>1</sup> · 김봉준<sup>2</sup> · 박은수<sup>2</sup> · 차달준<sup>2</sup>

# Development of Flow Forming Process for Hollow Shaped Parts from Seamless Steel Tube

Y. N. Kwon, S. W. Kim, B. J Kim, E. S. Park, D. J. Cha

(Received October 17, 2011 / Revised November 2, 2011 / Accepted November 8, 2011)

### Abstract

Flow forming is an incremental forming process in which rollers are used to form cylindrical parts with repeated turning of both roller and starting material. Both sheet and tube can be used as the starting material. The process is highly useful for producing hollow shaped parts from a tube, with the benefit of the average strain in the final shape being significantly lower than that from a sheet material. In the present study, the flow forming process was studied and optimized for producing a hollow shaped part from seamless steel tube by both experiment and numerical analysis. Upon considering the difficulty of forming seamless steel sheet, the thickness reduction was distributed over several tool paths. In the end, an optimum process condition was attained, and the experiment verified the simulation results.

**Key Words** : Flow Forming, Finite Element Method, Roll Path Design

### 1. 서 론

유동성형(flow forming)은 회전하는 성형 롤러(roller)의 운동 제어를 이용하여 판재소재를 점진적으로 성형하는 기술이다[1~3]. 유동성형기술을 통해 복잡한 형상을 완제품 치수에 최대한 가깝게 구현할 수 있으며 그 과정에 형성된 소재결(metal flow) 제어 및 가공 경화를 이용하여 기계적 특성(정적 강도, 피로 강도, 표면 경화) 향상을 달성할 수 있는 장점을 가진다. 유동성형공정은 축대칭 원형제품의 다품종 중·소량생산에 탁월한 경쟁력을 가지고 있다. 유동성형공정은 기존의 축대칭 원형제품을 대량생산할 때 사용되는 스탬핑(stamping) 공정 혹은 딥드로잉(deep drawing) 공

에 비해 가공 역학적으로 우수성을 가지고 있다. 즉, 스탬핑 및 딥드로잉 공정은 주로 수직력(normal force)을 이용하여 소재를 변형시키지만 유동성형공정은 전단력(shear force)을 주로 이용한다. 소성변형이 근본적으로 편차응력에 의해 유발되므로 수직응력의 편차 성분 보다는 응력값 그 자체가 편차응력인 전단응력이 훨씬 효과적으로 소성변형을 유발할 수 있다. 따라서, 유동성형성형장치는 가공력이 상대적으로 작아도 되기 때문에 설비 투자비 및 기타 직간접 비용을 대폭 줄일 수 있다. 유동성형기술은 근본적으로 스피닝(spinning) 공정과 유사한 회전 점진 성형 기술이지만, 스피닝은 투입소재의 두께보다 얇은 형상을 구현하는 기술인데 비해 유동성형기술로는 투입

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 융합공정연구본부

2. 경창산업㈜

# 교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 융합공정연구본부,

E-mail: kyn1740@kims.re.kr

소재보다 두꺼운 형상을 구현이 가능하다. 유동성형장비는 주요 요소는 roller, mandrel, tail-stock 으로 이들의 형상 및 운용 조합을 통해 다양한 형상의 부품을 일체화 성형할 수 있다.

본 연구에서는 자동차 변속기용 부품을 사용될 수 있는 중공형상의 부품을 제조하기 위하여 양 끝단에서 내부 직경과 동일한 직경을 가지는 튜브 소재를 이용하여 중앙부위를 축관 성형한 후 튜브의 양끝 부분에서 인장 성형하는 방식으로 중공 형상을 효과적으로 성형하는 방안을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 유한요소해석을 통하여 기초설계를 수행하였으며 제 유동성형 실험을 통하여 해석결과를 검증하는 연구를 수행하였다.



Fig. 1 Annulus gear sample having hollow geometry

## 2. 실험방법

본 연구에서 대상으로 삼은 중공부품은 Fig. 1에 나타난 것과 같은 형상을 가지는 자동변속기용 annulus gear 부품으로 그림에서 보이는 높이 방향으로 상이한 직경과 두께 분포를 가지는 부품이다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 기존에는 열간단조법을 통하여 제조되었기 때문에 원소재 기준으로 소재이용율이 매우 낮은 수준으로 열간단조 이후에도 다량의 기계가공이 필요하였다. 또한, 열간단조제품은 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 방안이 없는 반면에 유동성형제품은 소성변형에

의한 metal flow가 형성이 되어 추가적인 기계적 물성의 향상을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 3은 Fig. 1의 개발대상 중공부품을 유동성형하기 위한 방안으로 중심부에 작은 직경의 맨드릴로 소재를 밀어붙이고 상하로 롤러를 이동하여 성형을 하는 공법이다 Fig. 2의 공정을 위하여 원소재는 튜브소재를 사용하였다. 원소재는 550MPa 급의 인장강도를 가지는 seamless 튜브를 사용하였다. 원소재 튜브의 미세조직 및 인장특성을 Fig. 4와 Table 1에 정리하였다. 원소재 조직은 페라이트와 펄라이트가 혼합된 일반강으로 소성가공방향으로 연신된 결정립 배열을 보여주고 있다.

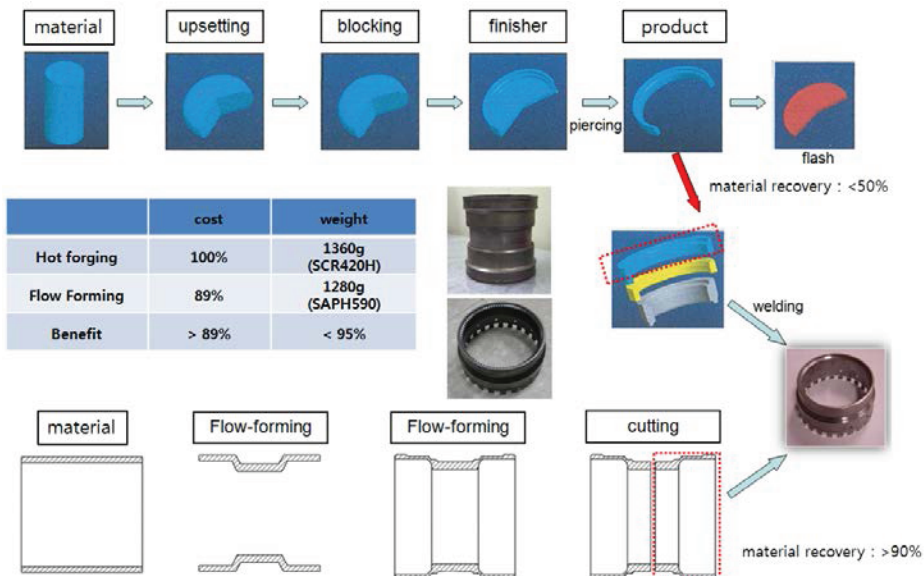


Fig. 2 Benefit comparison of two fabrication methods for hollow geometry part

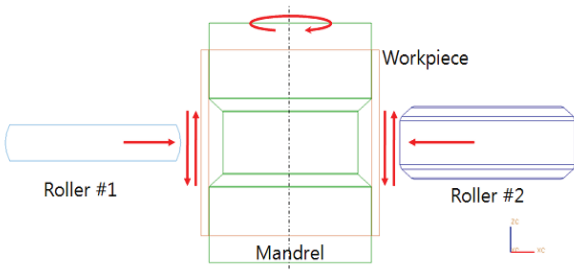


Fig. 3 Flow forming concept for hollow shape part

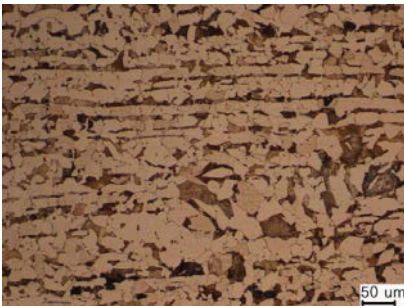


Fig. 4 Microstructure of tube used in the present study

Table 1 Tensile properties of tube material

YS(MPa)	UTS(MPa)	Elong.(%)
372.5	546.2	46.5

### 3. 유동성형 공정설계

본 연구에서는 자동차 변속기용 annulus gear 부품의 유동성형 공정기술 개발을 위해 Fig. 5에 나타난 것과 같이 annulus gear 부품의 양 끝단의 내부직경과 동일한 내부직경을 갖는 튜브소재를 이용하여 유동성형을 통해 중앙부위를 축관 성형한 후 양 끝단을 인장 성형함으로써 2 개의 annulus gear 부품을 제조한 후 중간부분을 절단하는 방법을 고안하였다. 이 제조 방안은 1 회 성형으로 대칭형상을 성형하여 절단을 통해 2 개의 제품을 제조할 수 있는 방법으로 제조공정 시간을 단축시킬 수 있는 효과적인 방법으로 판단된다.

예비실험은 소재를 냉간상태에서 수행하였으며 1 차 성형시 유동성형장비의 최대 부가 압력인 200bar 의 압력을 가하여도 축관이 이루어 지지 않았다. 소재의 두께 및 강도에 비해 장비의 허용 압력이 낮음에 기인한 것으로 판단된다. 이에 따라 소재를 고온으로 가열하여 성형성을 향상시킨

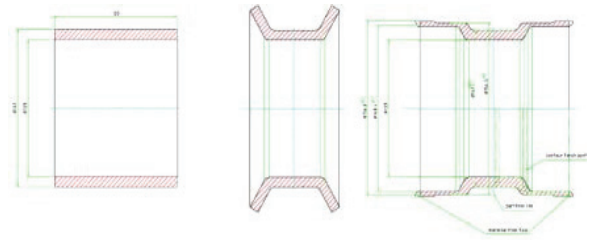


Fig. 5 Flow forming process design for annulus gear

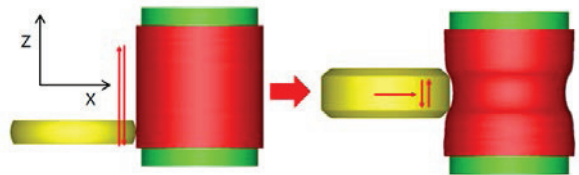


Fig. 6 Roll path design for annulus gear forming

후 유동성형 공정을 적용하는 공정안을 검토하였다. 이상의 방법에 대한 유한요소해석을 통해 적용 가능성을 검토하고, 이를 바탕으로 annulus gear 부품의 시제품제작을 위한 실험을 수행하였다.

Fig. 5에 나타난 유동성형 공정에서 실제 롤러에 부과되는 하중이 냉간상태에서는 매우 높은 것으로 1 차적으로 확인하였다. 이에 따라 축관성형시 롤러에 부과되는 하중을 최소화하고, 소재의 성형성을 향상시키기 위해 600℃에서 유동성형 공정해석을 진행하였다. Fig. 6은 개략적인 공구 경로를 보여주고 있는데 제품의 축관부 내측과 동일한 형상의 롤러로 축관할 경우, 롤러의 코너 부위에서 과도한 응력집중이 발생함에 따라 소재의 파단발생이 우려된다. 따라서, 이를 방지하기 위해 우선, 두께가 얇고 곡면으로 이루어진 성형용 롤러 #1을 이용하여 개략적인 형상으로 회전하는 튜브를 축관 성형한 후, 날카로운 코너 각을 가진 두 번째 성형 롤러 #2를 이용하여 제품의 중앙 축관 모서리부의 각도를 형성할 수 있도록 공구경로를 설계하였다. 참여기업에서 보유하고 있는 유동성형 성형장비는 동시에 2 개의 롤러의 작동을 지원하고 있으므로, 이 공정은 한 번에 장착된 두 개의 롤러를 순차적으로 이송시킴으로써 연속적인 성형이 이루어 질 수 있다.

#### ■ 1 단계 성형해석 결과(롤러 #1)

롤러 #1은 맨드릴에 의해 회전하는 소재에 접촉하여 3 차원 형상을 성형하므로 Fig. 6의 X-Z

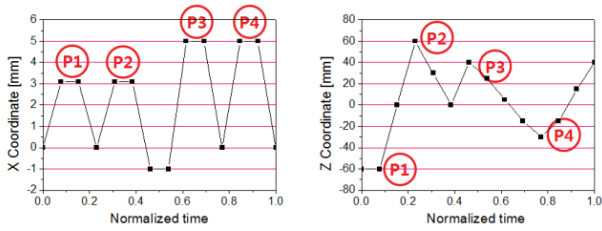


Fig. 7 Roll path for roller #1

평면 내에서 2 차원 운동을 하게 되며, 이에 대한 상세한 경로는 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 8에서 도시된 P1~P4는 롤러 #1이 회전축의 중심으로 이동하면서 소재에 접촉되는 위치를 나타내고 있다. 롤러 #1은 소재의 좌측하단에서 이동을 시작하여 상하좌우운동을 반복하면서 튜브의 중앙부를 개략적인 형상으로 축관하게 된다.

Fig. 8은 Fig. 7의 공구경로 위치별 변형형상, 유효변형률, 유효응력 분포를 보여주고 있다. P1에서는 롤러 #1이 튜브소재의 좌측하단에서 출발하여 X 방향으로 이동한 후 소재와 접촉하면서 약간의 소성변형을 유도하고 튜브소재의 중간영역까지 Z 방향으로 이동함으로써 튜브소재의 하측 끝단의 두께를 감소하기 위한 공정이며 P2는 롤러가 튜브소재의 좌측상단에서 출발하여 X 방향으로 이동한 후 소재와 접촉하면서 약간의 소성변형을 유도하고 튜브소재의 중간영역까지 Z 방향으로 이동함으로써 튜브소재의 상측 끝단의 두께를 감소하기 위한 공정이다. P3는 롤러가 축관부를 성형하기 위하여 축관부의 중앙에서 출발하여 X 방향으로 이동하여 튜브소재를 축관하고, 하단부로 이동하여 축관영역을 넓히는 공정이며, P4에서는 P3에서와 동일하나, 중반부에서 출발하여 상단부로 이동함으로써 상단부를 축관하는 공정이다. 롤러를 통해서 튜브소재의 중앙부위를 곡면으로 축관할 수 있었으나, 롤러는 축관부의 개략적인 형상을 성형하기 위한 공정으로 최종 성형후 Fig. 8(d)에서와 같이 축관부 양 끝단의 소재 미충진 현상이 발생하였다. 이는 2 번째 단계에서 날카로운 코너각을 가진 롤러에 의해 최소화될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9는 롤러 #1이 이동하는 공정중 요구되는 하중을 보여주고 있는데, 초기 튜브의 양끝단의 두께를 감소하기 위한 P1, P2 위치에서의 롤러 #1의 하중이 약 18~22ton으로 비교적 크게 나타났으며, 축관을 위한 P3, P4 위치에서의 롤러 #1의

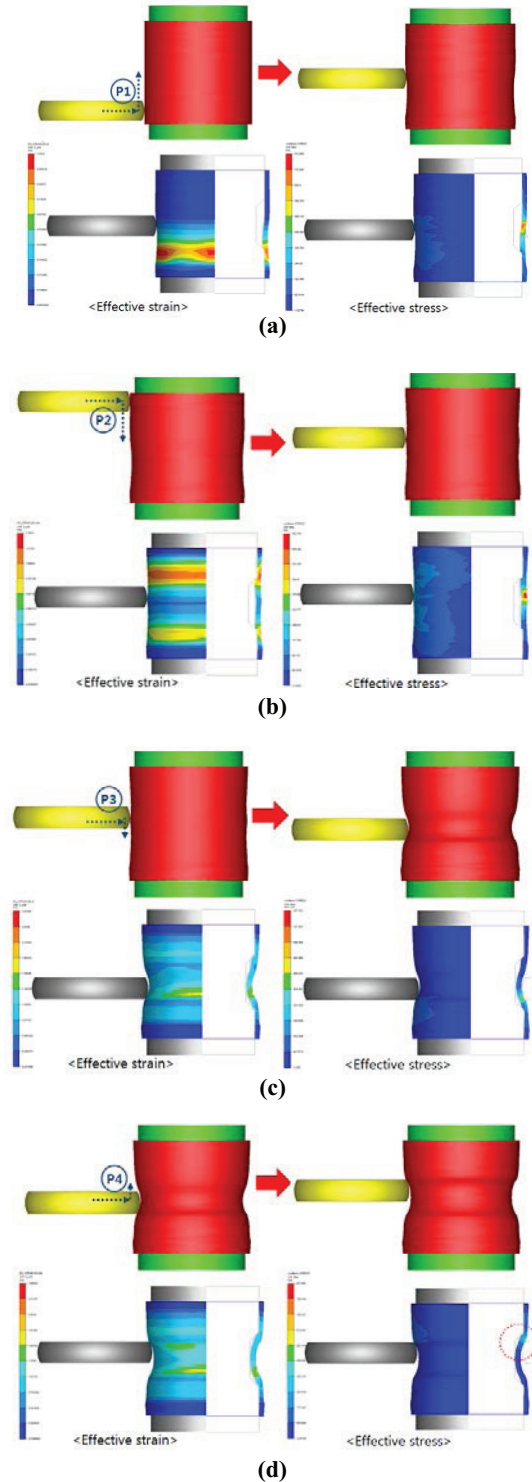


Fig. 8 Step-wise simulation results for roller #1, (a) P1, (b) P2, (c) P3, (d) P4

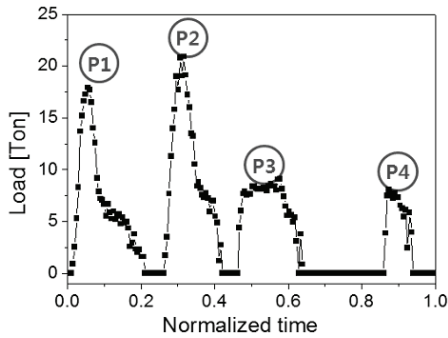


Fig. 9 Roll force prediction for roller #1

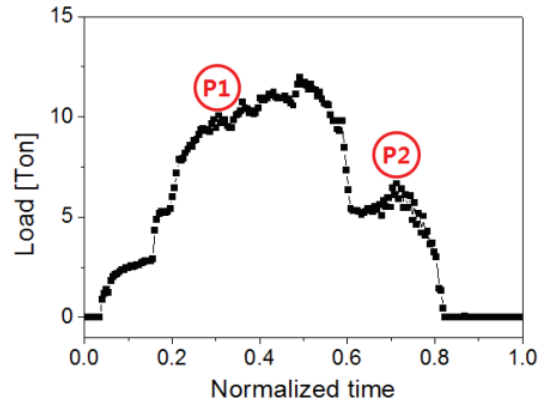


Fig.12 Roll force prediction for roller #2

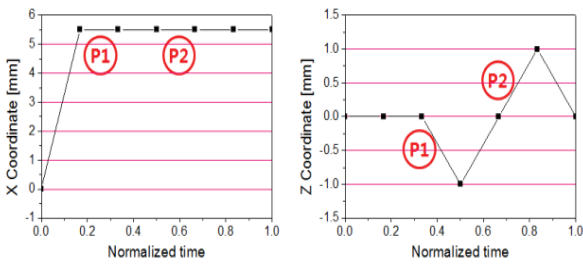


Fig.10 Roll path for roller #2

하중은 약 3ton 정도가 요구된다.

롤러 #1 에 의해 개략적으로 성형된 축관부의 형상을 보다 정확한 형상을 부여하기 위한 2 성형 단계는 축관부의 코너의 형상과 동일한 형상을 가진 롤러 #2 를 이용하여 유동성형 해석을 진행 하였으며, Fig. 10 은 롤러 #2 의 공구경로를 보여주고 있다.

롤러 #2 는 축관 중앙부에서 출발하여 X 방향으로 진행함으로써 소재의 축관부를 평탄화하고 상하측으로 이동함으로써 축관부의 양 끝단을 정밀 성형하는 공정으로 각 위치별 해석결과를 Fig. 11 에 도시하였다. 그 결과 Fig. 11 에 보여지는 바와 같이 튜브의 외측형상은 평탄하게 성형이 가능하였으며, 내측 코너부의 경우 1 단계에서의 미충진 부분을 많이 제거하였으나, 코너부의 소재 두께 감소로 인해 일부 미충진 부분은 여전히 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 12 는 롤러 #2 의 이동위치별 하중예측 결과를 보여주고 있는데 초기 소재와 접촉하여 축관부 평탄화가 이루어지는 P1 에서는 약 12ton 의 하중이 요구되었으며, 코너부를 형성하는 P2 에서는 약 7ton 의 롤러 하중이 요구되는 것으로 예측되었다.

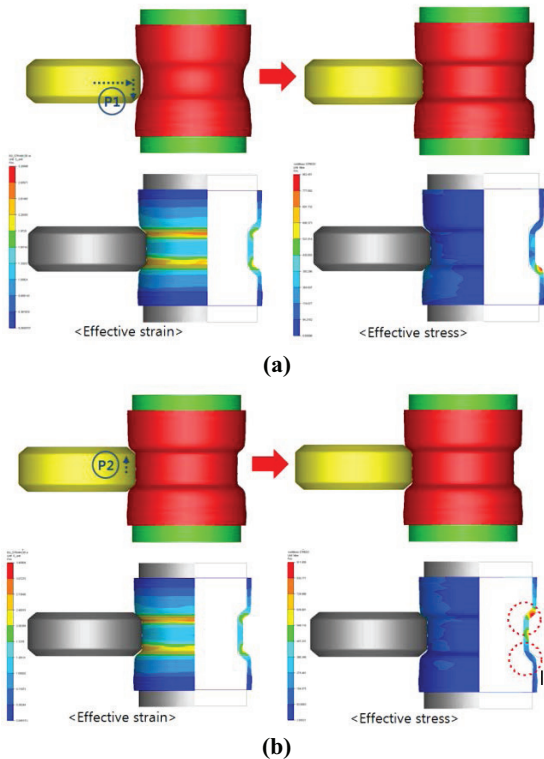


Fig.11 Step-wise simulation results for roller #2, (a) P1, (b) P2

#### 4. 시제품 제작

유한요소해석 결과를 기초로 annulus gear의 유동성형 실험을 수행하였다. 해석으로 검증한 설계안과 동일하게 튜브소재의 중앙부 축관을 위해 가열공정을 추가 하였다. 가열공정은 Fig. 13과 같이



Fig.13 Flow forming experiment for annulus gear

회전하는 평판위에 관재를 안착하고, 회전시킨뒤, 가스토치를 이용하여 반경방향으로 균일하게 가열되도록 하였으며, 접촉식 온도계를 이용하여 600℃까지 가열하였다.

1 차 성형은 이형제가 도포된 맨드릴에 가열된 소재를 안착하여 상부 맨드릴을 하(下)방향으로 가압함과 동시에 롤러 #1 을 이용하여 축관부를 3~4 회 반복하여 상하방향으로 이동함으로써 축관부의 대략적인 형상을 생성하였다. 이후 코너반경이 작은 롤러 #2 를 이용하여 축관부의 양 코너부의 형상을 생성하였다. 용도에 따라 롤러 #1, #2 는 각기 다른형상으로 제작되었으며, 맨드릴의 회전속도는 500~600rpm 으로 유지하였다.

2 차 성형은 1 차 성형으로 축관부가 형성된 단차를 가진 관재의 양 끝단부의 두께감소 및 형상구현을 위하여, 1 차 공정에서와 마찬가지로 동일한 형상의 맨드릴에 이형제를 도포하고 롤러 #3, #4 를 이용하여 유동성형 공정을 진행하였다. 롤러 #3 은 중앙부에서 상부로 이동하면서 1/2 형상을 성형하는 역할을 하였으며, 마찬가지로 동일한 형상의 롤러 #4 는 중앙부에서 하부로 이동하면서 나머지 1/2 형상을 성형하는 역할을 하였다.

Fig. 15 에 나타낸 것과 같이 1, 2 차 공정 후 제품형상은 비교적 설계했던 바와 유사한 형상으로 제작되었으나, 해석상 고려되지 않았던 튜브 양 끝단의 단차 형성시 다음과 같은 문제점이 발생되었다. 1 차 성형 공정후 축관된 코너부위가 직각으로 성형됨에 따라 2 차 성형시 소재가 폴딩되는 현상 발생하였다. 1 차 공정 후 코너부위를 기계가공하여, 경사각을 만들어줌으로써 이를 방지하였으나, 성형 공정중 가공공정이 추가됨에 따라 생산성에 문제점을 야기함에 따라, 1 차 성형공정의 공구경로 및 금형 형상 수정이 요구된다. 2 차

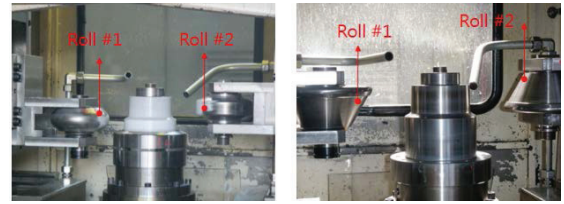


Fig.14 Rollers set-up for annulus gear forming

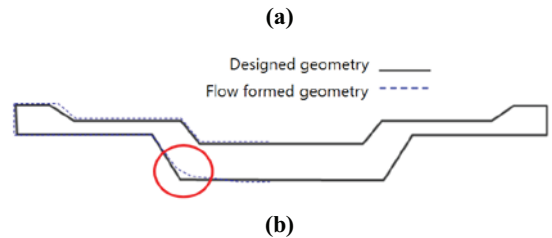


Fig.15 (a) forming samples (b) forming result compared to designed geometry

성형 공정 후 튜브의 외측은 기계가공여유를 제외하고 비교적 정확한 형상으로 성형되었으나 축관된 코너부위의 내측부분이 소재가 미충진 되는 현상이 발생하였다. 이는 앞서 수행되었던 해석에서와 동일한 현상으로 코너 부의 두께 감소로 인한 현상으로 판단된다. 따라서 축관 부의 길이를 확장하여 기계가공여유가 더 커지도록 공구경로에 대한 수정이 요구된다.

Fig. 16 는 유동성형 단계별 metal flow 를 나타내는 그림으로 제품의 길이 방향으로 metal flow 가 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 부위별로 두께 분포가 변화하며 가장 얇은 부위에서 가장 조밀한 metal flow 가 형성되어 있음을 알 수 있다. 공정별로 비교적 두께가 균일하게 형성되었으나 시험에 사용한 롤러의 직경이 고정되어 있기 때문에 2 차 성형품에서는 성형품에 롤러 직경의 영향이 반영되어 있다. 유동성형에 의한 가공경화에 따른 경도변화를 측정하기 위하여 그림에 표시한

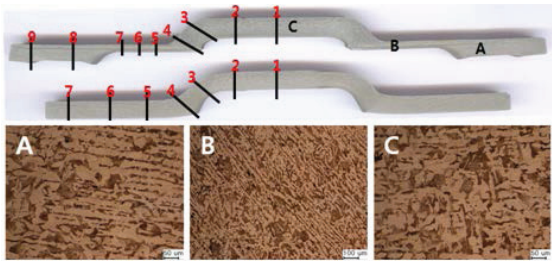


Fig.16 Metal flow and microstructure at several different sections for flow formed annulus gear

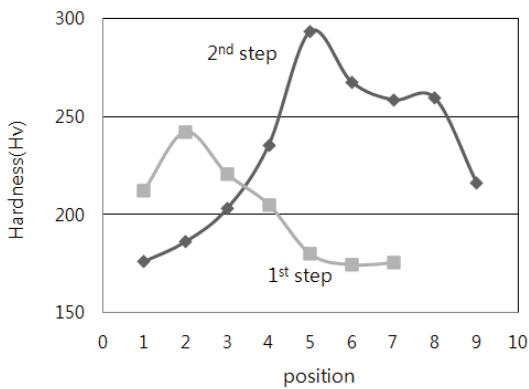


Fig.17 Hardness distribution for flow formed annulus gear

Table 2 Tensile properties for for flow formed annulus gear

	YS(MPa)	UTS(MPa)	Elong.(%)
1 <sup>st</sup> step	639.6	665.3	23.8
2 <sup>nd</sup> step	389.8	566.5	35.0

것과 같이 구간을 분할하여 경도를 측정하였다. Fig. 17 에 표시된 위치번호가 1, 2 차 성형에 걸쳐 정확하게 동일하지는 않지만 성형에 따른 경도변화를 추정할 수 있다. 1 차 성형시에는 가장 얇은 두께를 가지는 1, 2 번 구역이 가장 높은 경도를 가지며 2 차 성형품에서는 5~7 번 구역이 가장 얇은 두께를 가지기 때문에 가장 높은 경도를 가진다. 하지만, 2 차 성형품의 1~3 번 구역은 1 차 성형시의 경도보다 낮은 값을 가지는데 이는 시험에 사용한 장비의 하중이 부족하여 성형 전후에 가열을 통해 소재의 경도를 인위적으로 낮춘 것에 기인한다. 즉, 성형장비의 하중이 충분히 클 경

우 소재의 경도를 소재의 고유한 강화능력까지 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다. Table 2 는 annulus gear 성형 후 중심부(1, 2 차 성형품의 1~3 번 부위)에서 시편을 떼어내어 가공한 후 인장시험한 결과이다. 최종 2 차 성형품 기준으로 원소재에 비해 항복강도는 유사한 수준이나 인장강도는 조금 증가한 경향을 보여주고 있다. 1 차 성형품은 최종 2 차 성형품에 비해 상대적으로 높은 강도를 가진다. 앞서 설명한 것과 같이 단계별 성형전후에 가열을 하지 않을 경우 초기 550MPa 정도의 인장강도를 가지는 소재로도 700MPa 정도의 인장강도를 가지는 제품을 제조할 수 있는 가능성을 확인하였다. 강도의 증가에 반해 연신율은 감소하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 유동성형 제품 설계시 강종을 선택하는 기준으로 제품이 요구하는 강도와 연신율의 밸런스에 대한 기준이 필요할 것으로 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 축대칭 원통형상을 가지는 제품의 정형성형에 효과적으로 적용할 수 있는 유동성형에 관한 기초연구를 수행한 결과를 정리하였다. 유동성형을 이용하여 중공부품을 효과적으로 생산할 수 있는 가능성을 확인하였으며 공구경로의 추가적인 최적화를 통해 양산에 적용할 수 있는 수준의 제품을 제작할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 산업원천기술개발사업(과제명: Flow forming 및 Roll die forming 에 의한 치형 부품의 경량·일체화 성형 기반 기술 - 과제번호: 10033529)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. N. Nagarajana, H. Kotrappaa, C. Mallannaa, V. C. Venkatesha, 1981, Mechanics of Flow Forming, CIRP Ann., Vol. 30, No. 1 pp. 159~162.
- [2] C. C. Wong, J. Lin, T. A. Dean, 2005 Effects of Roller Path and Geometry on the Flow Forming of Solid Cylindrical Components, J. Mater. Process. Technol., Vol. 167, No. 2-3, pp. 344~353.

- [3] C. C. Wong, A. Danno, K . K. Tong, M. S. Yong, 2008, Cold Rotary Forming of Thin-wall Component from Flat-disc Blank, J. Mater. Process. Technol., Vol. 208, No. 1-3, pp. 53~62.
- [4] K. M. Rajan, P. U. Deshpande, K. Narasimhan, 2002, Effect of Heat Treatment of Preform on the Mechanical Properties of Flow Formed AISI 4130 Steel Tubes-a theoretical and experimental assessment, J. Mater. Process. Technol., Vol. 125-126, pp. 503~511.
- [5] P. Groche, David Fritsche, 2006, Application and Modeling of Flow Forming Manufacturing Processes for Internally Geared Wheel, Int. J. Mach. Tools Manuf, Vol. 46, No. 11, pp. 1261~1265.
- [6] S. I. Hong, S. H. Rhee and. S. J. Yun, 1998, A Study on the Neck-in Process by Flow-forming, Metals & Materials, Vol. 4, No. 4, pp. 895~898
- [7] J. N. Park, D. H. Kim, B. M. Kim, 2002, Experiemental Investigation on the Flow Control of Hub Clutch for Automotive, Trans. Mater. Process., Vol. 11, No. 5, pp. 430~438.