

# 좌우 대칭 모자형 단면이 길이 방향으로 선형적으로 변하는 롤 포밍 공정의 개발

김광희\*, 윤문철\*,#

\*부경대학교 기계설계공학과

## Development of a Roll-Forming Process of Linearly Variable Symmetric Hat-type Cross-section

Kwang-Heui Kim\*, Moon-Chul Yoon\*#

\*Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National UNIV.

(Received 22 May 2015; received in revised form 18 June 2015; accepted 24 June 2015)

### ABSTRACT

The roll-forming process is a highly productive incremental forming process and is suitable for manufacturing thin, high-strength steel products. Recently, this process has been considered one of the most productive processes in manufacturing high-strength steel automotive structural parts. However, it is very difficult to develop the roll-forming process when the cross-sectional shape of the product changes in the longitudinal direction. In this study, a roll-forming process for manufacturing high-strength steel automotive parts with a linearly variable symmetric hat-type cross-section was developed. The forming rolls were designed by the 3D CAD system, CATIA. Additionally, the designed forming rolls were modified by the simulation through the 3D elastic-plastic finite element analysis software, MARC. The results of the finite element analysis show that the final roll-forming roll can successfully produce the desired high-strength steel automotive part with a variable cross-section.

**Key Words** : High Strength Steel Strip(고강도강판), Roll Forming(롤 포밍), Variable Cross-section(가변단면)

### 1. 서 론

최근 자동차 업계는 높은 연비를 얻기 위하여 차체중량 줄이기에 많은 노력을 기울이고 있다. 차량의 안전성을 강화하면서도 중량을 줄일 수 있는 가장 경제적인 방법은 기존 제품보다 더 얇은 고강도강판(high strength steel strip)으로 자동차 부품을 제작하는 것이다. 그러나 소재의 강도가 높아지면서

두께가 얇아질수록 성형성이 나빠져서 생산비가 급격히 높아지는 문제점이 있다.

이 문제점을 해결하기 위한 하나의 방법으로, U형 단면 형상이 길이 방향을 따라 선형적으로 변화하는 고강도강 제품을 제작할 수 있는 롤 포밍(roll forming) 공정 개발 연구를 수행하여 롤 포밍 공정으로 가변단면을 가진 고강도강 자동차 부품을 경제적으로 생산할 수 있음이 확인되었다[1].

본 연구에서는 이전의 연구를 연장하여 좌우 대칭 모자형(hat-type) 단면형상이 길이 방향으로 선

# Corresponding Author : mcyoona@pknu.ac.kr  
Tel: +82-51-629-6160, Fax: +82-51-629-6150

형적으로 변하는 제품을 생산 할 수 있는 롤 포밍 공정을 개발하고자 하였다. 포밍 롤은 3차원 CAD 소프트웨어인 CATIA를 이용하여 설계하였고 범용 유한요소해석 소프트웨어인 MARC를 이용하여 이 공정을 3차원 탄소성유한요소법으로 해석하면서 수정 보완하였다.

## 2. 포밍 롤 설계 및 해석

### 2.1 가변 단면 롤 포밍 제품

Fig. 1에 보인 것과 같이 좌우 대칭인 모자형 단면 형상의 안쪽 바닥 직선부 폭이 선단의 100mm에서 후미의 105mm로 길이방향을 따라 선형적으로 증가하는 약간 테이퍼진 제품을 평판으로부터 성형할 수 있는 포밍 롤을 설계하였다. 모든 굽힘부의 굽힘각은 Fig. 1과 같이 모두 90°이고 내측 굽힘 반경은 2.67mm로 선택하였다. 제품의 두께는 1.2mm, 길이는 386.25mm이며, 좌우 측벽의 높이는 선단과 후미에서 모두 30mm로 일정하게 유지되는 형상으로 선택하였다.

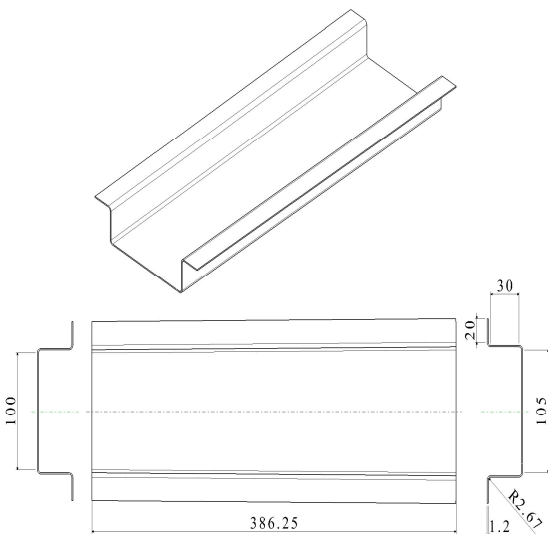


Fig. 1 The part with linearly variable symmetric hat-type cross-section

### 2.2 첫 번째 포밍 롤 세트

제품의 단면 형상이 좌우 대칭 형상이므로 포밍 롤의 오른쪽 반만 설계하기로 하였다. 제품의 단면 형상이 길이 방향으로 변화하므로 각 단의 포밍 롤이 1회전할 때마다 소재는 정확히 1개의 제품 길이만큼 전진하면서 성형되어야 한다. 따라서 소재는 성형되는 동안 각단에서의 상하 포밍 롤 사이로 진입하였다가 빠져 나오기를 반복하게 되므로, 성형이 매우 조금씩 이루어져야 결함이 없는 높은 정밀도의 제품을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 먼저 각 굽힘부를 10°씩 굽힘각을 증가시켜 총 9회에 걸쳐 굽히는 방법을 선택하였으며 성형 해석을 통하여 문제점이 파악되면 수정하고 필요한 단을 추가하기로 하였다.

제품의 단면 형상이 길이 방향을 따라 선형적으로 변화하므로 제품의 선단과 후미의 단면 형상에 대한 플라워(flower)를 따로 작성한 후, 각 단의 선단과 후미 단면 형상을 선형적으로 보간(interpolation)한 형상을 성형할 수 있도록 포밍 롤 형상을 생성하였다.

두께가 얇은 고강도 강판은 스프링백이 크게 발생하며 그 양을 미리 정확하게 예측하기는 어렵기 때문에 각 굽힘부를 정확하게 90°가 되도록 가공하기는 쉽지 않다. 따라서 스프링백의 크기를 예측하기 위하여 첫 번째 시도로 Fig. 2와 같이 각 굽힘부의 굽힘각을 10°씩 증가시켜 총 9회에 걸쳐 굽히는 플라워를 작성하였다. Fig. 2에서 (a)는 등축도(isometric view)가 되는 방향에서, (b)는 선단 쪽에서, (c)는 위쪽에서, (d)는 우측에서 각각 바라본 모습이다.

이 플라워를 이용하여 설계된 포밍 롤 세트의 모습은 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 (a)는 우측 상단부터 제 1단, 제 2단, 제 3단의 롤 모습이며, (b)는 제 4단, 제 5단, 제 6단, (c)는 제 7단, 제 8단, 제 9단의 롤 모습이다.

설계된 포밍 롤에 대한 성형 해석에는 소재와 직접 접촉하는 곡면만 사용되므로 각 포밍 롤의 표면의 곡면만 생성하였다.

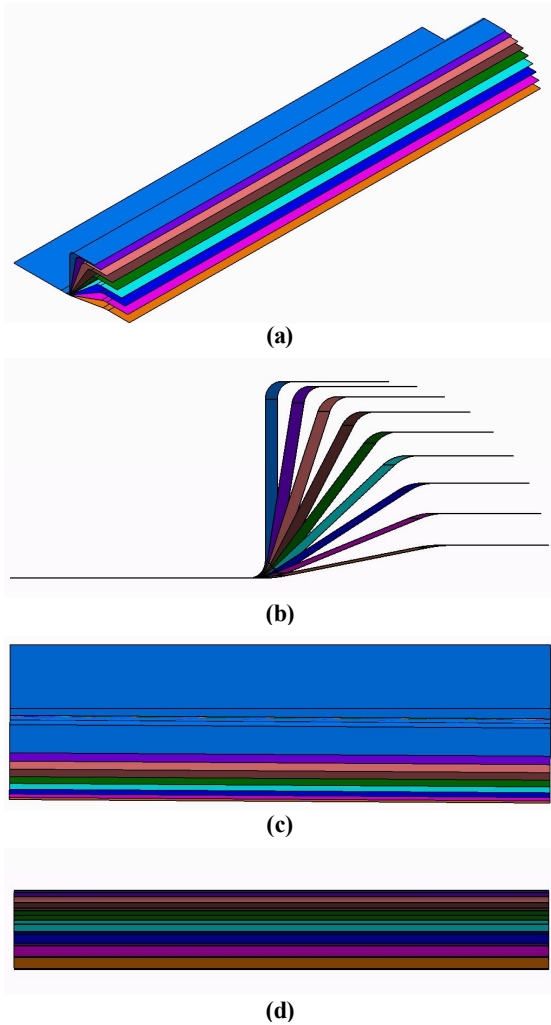


Fig. 2 The first flower, (a) isometric view, (b) front view, (c) top view, (d) right view

범용 유한요소해석 소프트웨어 MARC를 이용하여 Fig. 3의 포밍 롤 세트에 대한 성형해석을 수행하였다. 해석 방법은 이전의 연구와 유사하게 체적요소를 이용한 탄소성 유한요소해석을 채택하였다<sup>[2-4]</sup>. 소재의 물성자료는 실험을 통하여 구한 고강도강(SPF C 1180)의 자료<sup>[5]</sup>를 사용하였다. 각 단 사이의 거리는 현재 보유중인 실험용 3단 소형 롤 포밍기의 사양에 맞추어 250mm로 택하였다.

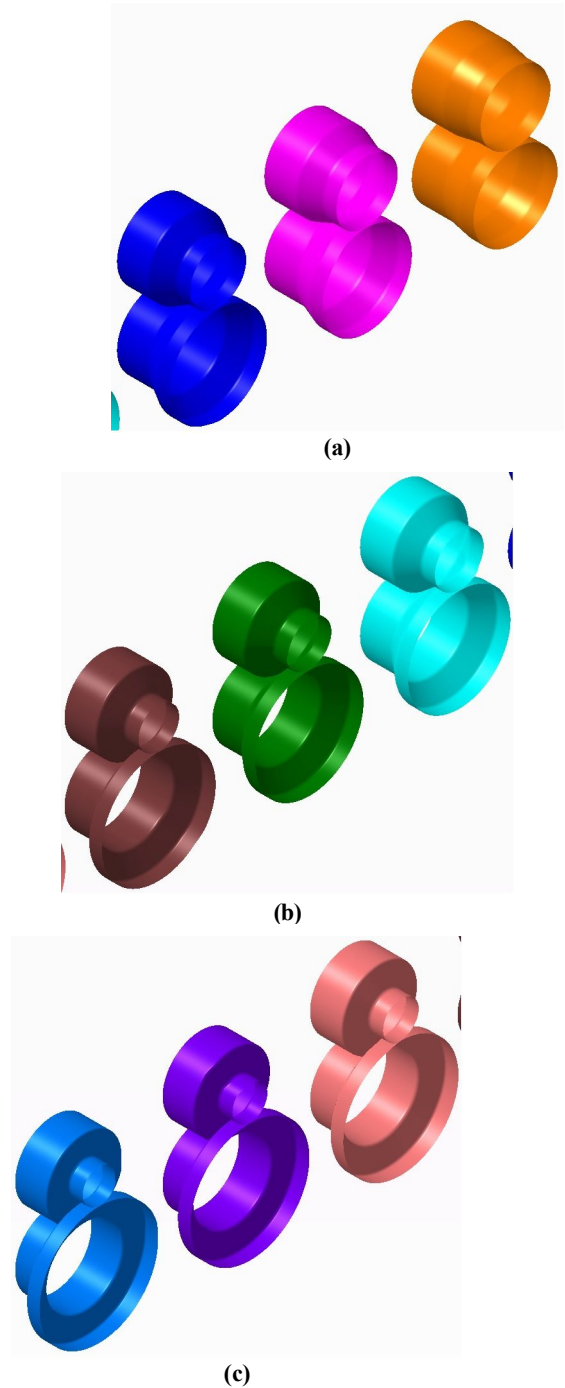
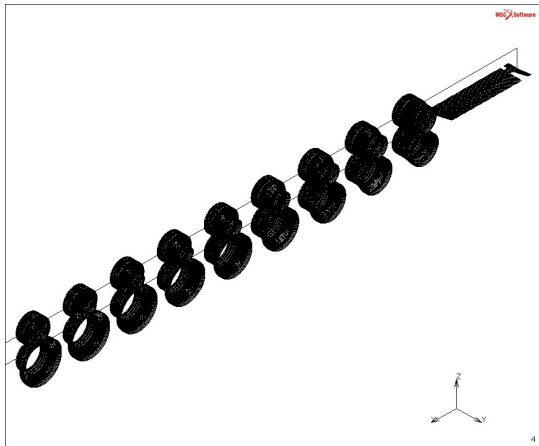


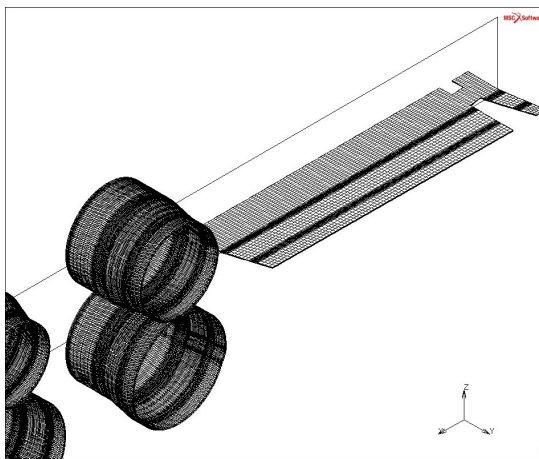
Fig. 3 The first forming roll set, (a) Pass 1, 2, 3(from upper right), (b) Pass 4, 5, 6, (c) Pass 7, 8, 9

Fig. 4는 Fig. 3의 포밍 롤 세트의 표면정보를 stl과 illo로 변환하여 MARC에서 읽어 들여 작성된 유한요소해석 모델의 해석 초기 모습이다. 보다 정확한 스프링백의 예측을 위하여 8절점 육면체 체적요소를 소재의 두께 방향으로 4층으로 배열되도록 모델링하였다.

Fig. 5는 소재 선단의 일부가 마지막 단인 제 9단의 포밍 롤을 빠져나왔을 때 소재가 변형된 모습과 소성변형률(total equivalent plastic strain)의 분포를 보여주고 있다. 제 8단을 통과할 때까지는 소성변형이 굽힘부에만 제한되어 발생하지만 Fig. 5에서 원으로 표시된 영역과 같이 제 9단을 통과하면서



(a)



(b)

Fig. 4 The initial finite element analysis model, (a) overall view, (b) Pass 1 and initial blank

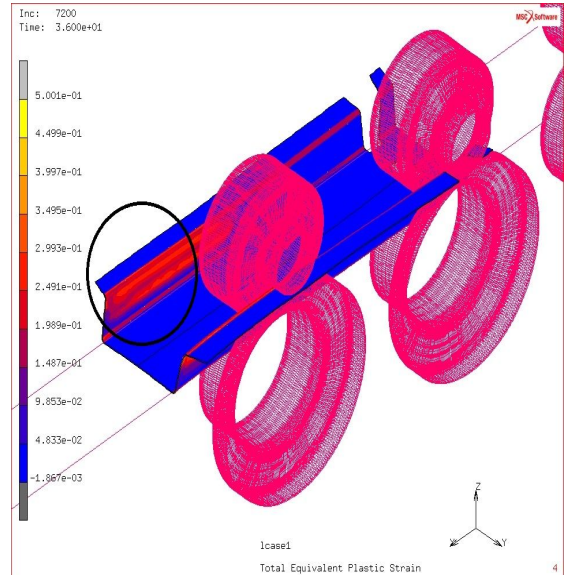


Fig. 5 The deformed shape and strain distribution after 9<sup>th</sup> pass

상하 롤과 약간의 간섭이 발생하여 소재의 양쪽 측벽에서도 0.2 ~ 0.3 정도의 비교적 큰 소성변형률이 발생함을 보여 주고 있으며 이는 매우 바람직하지 못하므로 포밍 롤의 수정이 필요함을 알 수 있다.

### 2.3 두 번째 포밍 롤 세트

Fig. 2의 첫 번째 플라워의 제 7, 8, 9단에서 소재의 단면 가운데 직선 부분을 점차 큰 반경으로 각각 5°, 10°, 15°로 굽혀주도록 수정하고, 스프링백이 약 10° 정도로 발생할 것으로 예측하여 굽힘각이 100°가 되면서 소재의 단면 가운데 직선 부분을 대칭축의 오른쪽을 20°로 굽혀주는 마지막 제 10단을 추가하여 Fig. 6과 같이 플라워를 수정하였다. 이 수정된 플라워를 이용하여 다시 설계된 포밍 롤 세트는 제 1단에서 제 6단까지는 Fig. 3과 동일하다. 수정된 제 7, 8, 9단과 추가된 제 10단의 포밍 롤 모습을 Fig. 7에 보였다. Fig. 3(c)와 비교하여 보면 소재의 단면 가운데 직선 부분이 굽혀진 결과로 제 7, 8, 9단의 위쪽 롤들의 가운데 부분이 약간 오목한 모습을 보이게 됨을 알 수 있다.

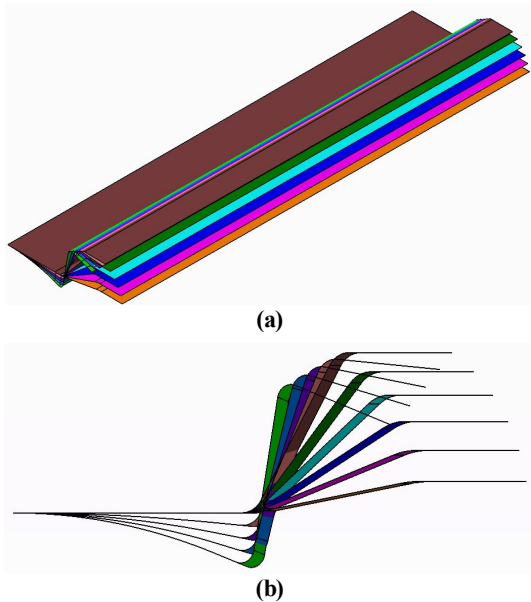


Fig. 6 The second flower, (a) isometric view, (b) front view

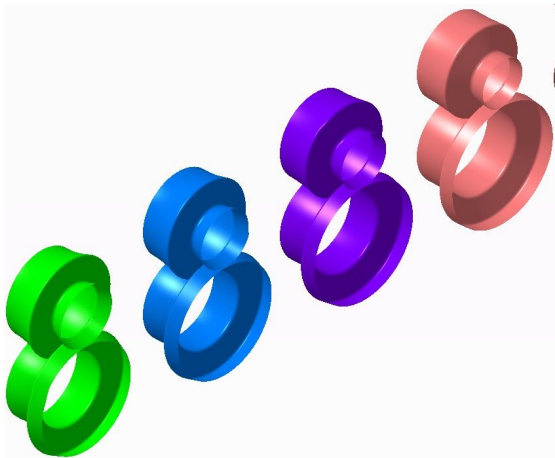


Fig. 7 The second forming roll set, Pass 7, 8, 9, 10

Fig. 8은 소재 선단의 일부가 마지막 단인 제 10 단의 포밍 롤을 빠져나왔을 때 소재가 변형된 모습과 소성변형률의 분포를 보여주고 있다. Fig. 8에서 원으로 표시된 영역과 같이, 각 굽힘부의 굽힘각이 90°가 되는 제 9단을 통과하면서도 소재의 양쪽 측면에 더 이상 소성변형이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

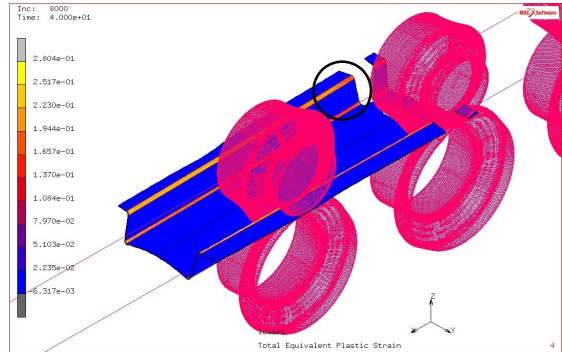


Fig. 8 The deformed shape and strain distribution after 10<sup>th</sup> pass

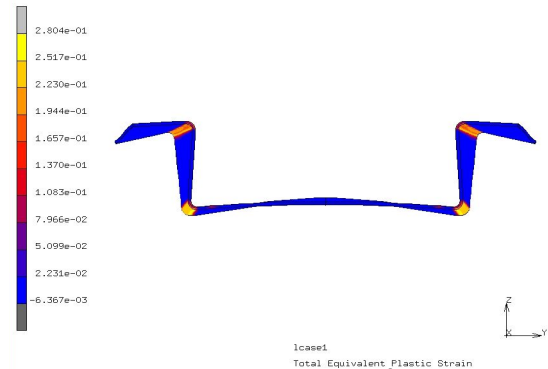


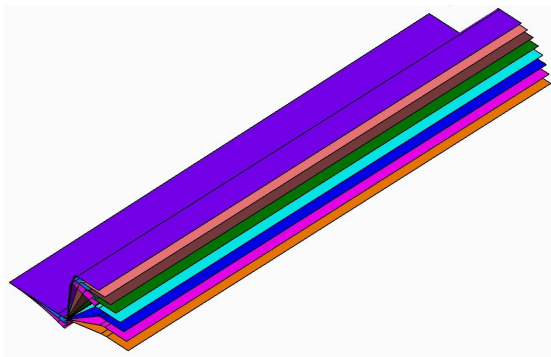
Fig. 9 The deformed shape after 10<sup>th</sup> pass

Fig. 9는 소재 후미가 마지막 단인 제 10단의 포밍 롤을 빠져나온 직후 소재의 선단 쪽에서 바라본 제품의 모습이다. 소재의 선단 쪽에서는 가운데 직선 부분이 직선상태로 복원되지 못하고 대칭축으로부터 4.7° 굽혀졌고 각 굽힘부는 안쪽으로부터 각각 98.1°, 96.5°로 굽혀져 목표 값 90°보다 과도하게 굽혀졌다. 후미 쪽에서는 가운데 직선분이 대칭축으로부터 9.3° 굽혀졌고 각 굽힘부는 안쪽으로부터 각각 94.0°, 98.2°로 굽혀졌다. 각 굽힘부의 스프링백을 10°로 예측하였으나 각 굽힘부의 내측 굽힘반경을 소재 두께의 2.2배로 너무 작게 선정하였기 때문에 스프링백이 예상보다 적게 발생하였다. 또 제 10단에서 가운데 직선부분을 20° 굽힐 경우에는 최대 9.3° 굽혀진 상태로 남게 되므로 우선 이 굽힘각을 5° 만큼 줄이기로 하였다.

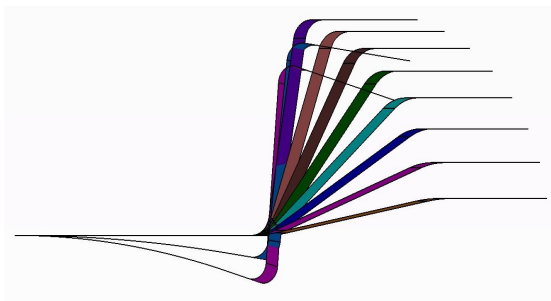


### 2.4 세 번째 포밍 롤 세트

Fig. 6의 두 번째 플라워에서 최종 단인 제 10단에서 소재의 단면 가운데 직선 부분의 굽힘각을 5° 만큼 줄여 15°로 수정하면서, 제 7, 8단에서는 원래 직선이던 부분을 굽히지 않고 제 9단에서만 7.5°로 굽히도록 Fig. 10과 같이 플라워를 수정하였다. 이 수정된 플라워는 Fig. 2에 보인 맨 처음의 플라워에서 제 9단만 가운데 직선 부분을 7.5°로 굽히도록 수정하고, 가운데 직선 부분을 15°로 굽히면서 각 굽힘부의 굽힘각이 각각 100°가 되는 제 10단을 추가한 것과 같다. 이 플라워를 이용하여 수정된 제 7, 8, 9, 10단의 포밍 롤 세트의 모습은 Fig. 11과 같다. Fig. 7과 비교하여 보면 소재의 단면 가운데 직선 부분을 굽히지 않기로 한 결과로 제 7, 8단의 위쪽 롤들의 가운데 부분이 다시 평평한 모습으로 바뀌었음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 10 The third flower, (a) isometric view, (b) front view

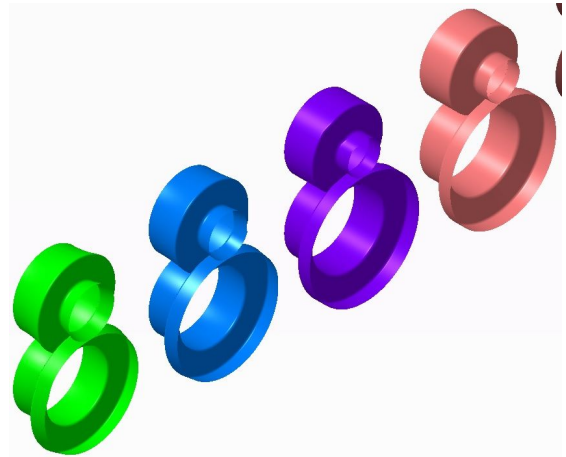


Fig. 11 The third forming roll set, Pass 7, 8, 9, 10

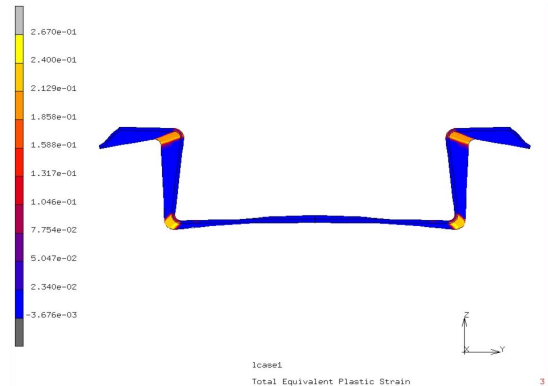


Fig. 12 The deformed shape after 10<sup>th</sup> pass

Fig. 12는 소재 후미가 마지막 단인 제 10단의 포밍 롤을 빠져나온 직후 소재의 선단 쪽에서 바라본 제품의 모습이다. 소재의 선단 쪽에서는 가운데 직선 부분이 대칭축으로부터 1.5° 굽혀져 거의 직선으로 되돌아왔고 각 굽힘부는 안쪽으로부터 각각 97.9°, 95.6°로 굽혀졌다. 후미 쪽에서는 가운데 직선 부분이 대칭축으로부터 6.5° 굽혀졌고 각 굽힘부는 안쪽으로부터 각각 94.2°, 98.0°로 굽혀졌다.

Fig. 9와 비교하여 보면 각 굽힘부의 굽힘각은 거의 변화가 없으며, 단면 가운데 직선 부분이 약간 개선되었으나 후미 쪽은 아직 6.5° 굽혀져 있으므로 제 10단의 직선 부분의 굽힘각을 조금 더 줄여야 할 필요가 있음을 알 수 있다.

## 2.5 네 번째 포밍 롤 세트

Fig. 10의 세 번째 플라워에서 최종 단인 제 10단에서 각 굽힘부의 굽힘각을 5°씩 줄여 95°로 줄이고, 소재의 단면 가운데 직선 부분의 굽힘각을 5°만큼 더 줄여 10°로 수정하여 Fig. 13과 같이 플라워를 수정하였다. 이 수정된 플라워를 이용하여 설계된 포밍 롤 세트의 모습은 Fig. 11의 세 번째 포밍 롤 세트에서 최종 단인 제 10단의 포밍 롤만 수정된 것과 같다. Fig. 14에 최종 단인 제 10단의 포밍 롤의 모습만 보였다.

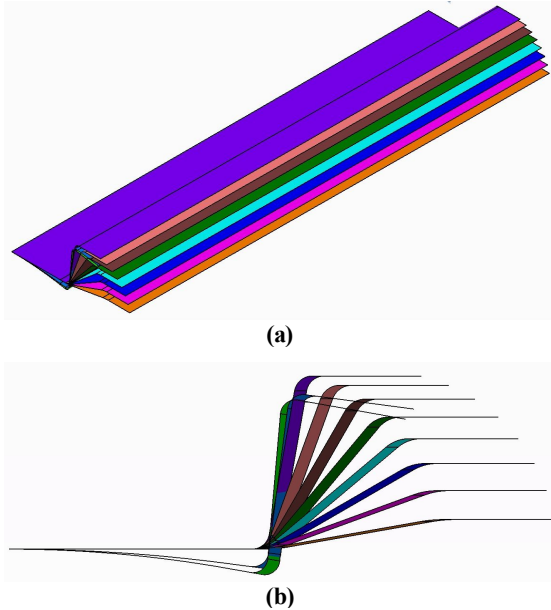


Fig. 13 The fourth flower, (a) isometric view, (b) front view

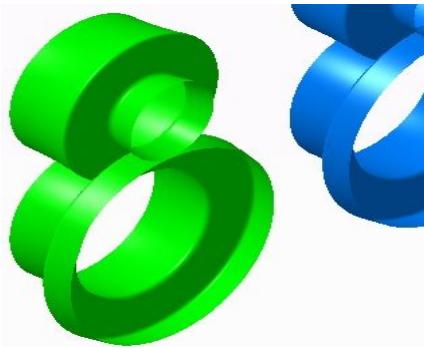


Fig. 14 The fourth forming roll set, Pass 10

Fig. 15는 소재 후미가 마지막 단인 제 10단의 포밍 롤을 빠져나온 직후 소재의 성형된 최종 모습을 여러 방향에서 바라 본 모습이다. 소재의 선단 쪽에서는 가운데 직선 부분이 대칭축으로부터 0.7° 굽혀져 거의 직선으로 돌아왔고 각 굽힘부는 안쪽으로부터 각각 90.7°, 89.9°로 굽혀져 목표값 90°에 매우 가깝게 굽혀졌다. 후미 쪽에서는 가운데 직선분이 대칭축으로부터 0.3° 굽혀졌고 각 굽힘부는 안쪽으로부터 각각 91.3°, 92.2°로 굽혀져 약간 더 굽혀졌다.

최종 제품의 가운데 직선부는 최대 굽힘각 0.7°로 거의 직선 상태로 되돌아 왔고, 각 굽힘부는 최대 2.2° 더 굽혀졌다. 따라서 제품에 큰 결함이 없이 원하는 형상대로 성형되었음을 알 수 있다. 옆쪽과 위쪽에서 본 모습에서 제품의 선단 쪽이 약간 기울어져 보이는 것은, 소재의 선단 쪽이 각 단 롤 사이로 부드럽게 진입되도록 초기 소재 형상을 일부러 중앙부에서 가장자리 부분방향으로 비스듬한 형상이 되도록 만들었기 때문이며 실제 공정에서는 절단하여 제거되어야 할 부분이다.

## 3. 롤 포밍 실험 및 고찰

이전의 연구를 통하여 본 연구에서 사용된 유한요소해석 방법은 실제 롤 포밍 실험 결과를 매우 잘 예측할 수 있음이 확인되었다<sup>[1]</sup>. Fig. 14에 제 10단의 포밍 롤을 보여주고 있는 최종 포밍 롤 세트는 유한요소법에 의한 해석에 의하면, 모자형 단면형상이 길이 방향으로 선형적으로 변하는 고강도강 제품을 굽힘각 오차 최대 2.2° 이내로 제작할 수 있음을 확인하여 주고 있다.

그러므로 추후 수행될 실제 롤 포밍 공정실험에서도 큰 어려움은 없을 것으로 생각할 수 있다. 다만 이 포밍 롤의 형상이 단순한 축대칭 형상이 아니고 3차원 형상이므로 고가의 5축 CNC 기계를 사용한 가공을 거쳐야만 제작이 가능하므로 많은 가공비가 소요되기 때문에 경제적으로 포밍 롤을 가공할 수 있는 방법에 대한 많은 추가적인 연구가 필요하다.

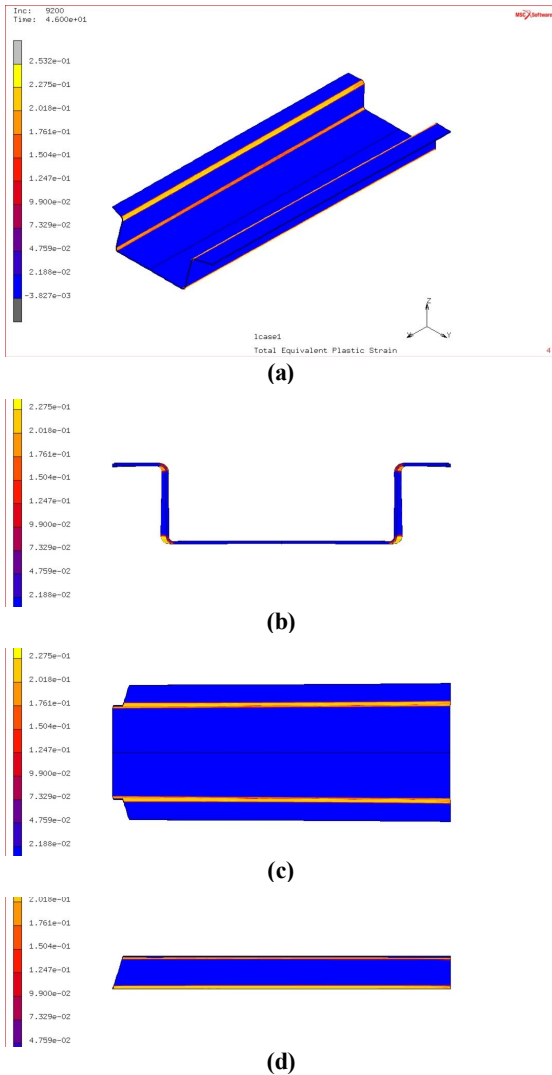


Fig. 15 The deformed shape after 10<sup>th</sup> pass, (a) isometric view, (b) front view, (c) top view, (d) right view

#### 4. 결 론

본 연구에서는 CATIA를 이용하여 포밍 롤을 설계하고 MARC를 이용한 탄소성유한요소해석을 통하여 좌우 대칭 모자형 단면형상이 길이 방향으로 선형적으로 변하는 고강도강 제품을 생산할 수 있는 롤 포밍 공정을 개발하였다. 유한요소해석에 의

하면 굽힘각 오차 최대 2.2° 이내로 제작할 수 있음이 확인되었다.

추가적인 많은 연구를 수행하면 복잡한 비대칭 단면 형상이 길이방향으로 비선형적으로 변화하는 고강도강 자동차 부품까지 경제적으로 생산할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

또한 제품의 길이가 길어지면 포밍 롤의 직경도 커져서 제작비도 상승하기 때문에 경제적 롤 가공 방법에 대한 연구가 동시에 수행될 필요가 있다.

#### 후 기

“이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었음.”

#### REFERENCES

1. Kim, K. H. and Shim, H. B., “Development of a Roll forming Process of Linearly Variable Symmetric U-type Cross-section”, Proc. of the KSTP Spring Conference 2015, pp. 195-198, 2015.
2. Kim, K. H. and Yoon, M. C., “Finite Element Analysis of the Extrusion Process for an Automobile Bumper”, J. KSMPE, Vol. 4, No. 1, pp. 24-29, 2005.
3. Kim, K. H. and Sim, S. B., “Development of Roll Forming Process for an Automotive Part of High Strength Steel”, J. KSMPE, Vol. 4, No. 3, pp. 45-50, 2005.
4. Kim, K. H. and Kim, B. T., “Finite Element Analysis of the Roll Forming Process using the Solid Elements”, Proc. of the KSMPE Autumn Conference 2006, pp. 151-154, 2006.
5. Kim, K. H. and Yoon, M. C., “Measurement of Longitudinal Strain in the Roll Forming Process”, Proc. of the KSMPE Autumn Conference 2006, pp. 147-150, 2006.