Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 13, No. 11 pp. 4950-4955, 2012

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.11.4950

유한요소법을 이용한 SCM435 Bolt의 성형 공정에 관한 해석 및 공정 개선 방안

안교철[1*], 최취경[2]
[1]가천대학교 건축설비공학과, [2]가천대학교 건축공학과

Plan on the Analysis and Improvement of the Molding process of SCM435 bolt by use of the Finite Element Method

Kyo-chul Ahn[1*] and Chui-Kyung Choi[2]
[1]**Dept. of Building Equipment & System Engineering, Gachon University**
[2]**Dept. of Architectural Engineering, Gachon University**

요 약 볼트의 제작 공정은 연속적인 단조 작업에 의해서 완성되는데 각 공정의 기술적, 경제적인 성공은 적절한 공정설계와 각 작업에 필요한 금형 설계에서 좌우된다. 본 연구에서는 다단 공정에 의해서 이루어지는 SCM435 볼트의 성형과정 중에서 1, 2단계의 성형을 유한요소법을 이용하여 해석하여 합리적인 공정이 이루어지도록 개선 방향을 제시하고자 하며 유한요소법을 이용하여 해석한 1, 2단계의 공정은 축대칭이 성립되므로 소재의 변형 형상이 공정에서 기대했던 치수를 만족할 수 있었으며 소재에 형성된 단류선이 전 공정을 통하여 부드럽게 연속적으로 형성됨을 알 수 있었으므로 소재의 성형 뿐 아니라 내부의 결함도 없을 것으로 예상되었다.

Abstract A bolt manufacturing process is completed with continuous forging. Technical and economical success of each process will depend on the appropriate process design and metal mold design for each procedure. This study aims to analyze the moldings of first and second steps among the multi-step molding processes of SCM435 bolt by use of the finite element method in order to achieve the reasonable process. Since the processes of first and second steps analyzed by use of the finite element method consist of axial symmetry, the transformed configuration of material satisfy the dimensions expected in process. In addition, the uniflow line formed in material becomes smooth and consistent over the entire process. Therefore neither molding of material nor inherent defect is expected.

Key Words : Finite element method, Molding, Forging, Metal mold.

1. 서론

냉간 단조에 의해 성형되는 부품은 원 소재로부터 최종 형상으로 제작되기까지 연속적인 단조작업에 의해서 완성되며, 각 공정의 기술적, 경제적 성공은 적절한 공정설계와 각 작업에 필요한 금형설계에서 좌우된다.[1] 과거에는 공정설계를 위해서 여러 가지 근사적 방법들이 시도되어서 성형력, 소재의 변형형상, 단류선 등을 추정하였다. 그러나 각 공정 중에서 이들에 대한 좀 더 정밀한 값을 얻기 위한 시도는 소성가공에 유한요소법이 응용되면서 광범위하게 이루어지게 되어 현재 소성 공정설계에 널리 사용되고 있다.

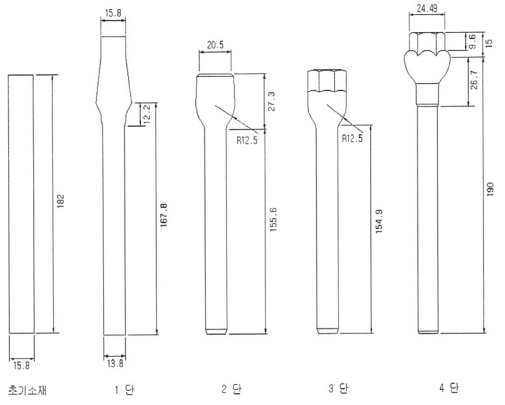
본 연구에서는 다단 공정에 의해서 이루어지는 SCM435(Torsion bar) bolt의 성형과정 중에서 1, 2단계의

본 연구는 2012년 가천대학교 교내연구비 지원에 의해 수행된 연구임.
*Corresponding Author : Kyo-chul Ahn
Tel: +82-11-770-3724 email: kcahn@gachon.ac.kr
접수일 12년 10월 08일 수정일 (1차 12년 10월 26일, 2차 12년 11월 06일) 게재확정일 12년 11월 08일

성형을 유한요소 package 중 하나인 AFDEX-2D를 이용하여 공정을 해석하며[2] 소재의 변형 형상이나 표면상태의 타당성을 검토하여 적절한 개선방안과 합리적인 공정이 이루어지도록 개선 방향을 제시하고자 한다.

2. Bolt의 성형공정

Bolt의 성형공정은 그림1과 같이 1단계에서는 초기 소재의 머리부 예비성형과 몸통부의 압출공정을, 2단계에서는 머리부 2차성형을, 3단계에서는 6각 머리부의 성형을 하고 마지막 4단계에서는 머리부 4차 성형과 몸통부의 압출공정을 실시하여 최종 제품을 성형한다.



[그림 1] Torsion bar bolt의 4단 성형 공정도
[Fig. 1] Molding process of torsion bar bolt

본 연구에서는 유한요소 단조 해석 패키지 중 하나인 AFDEX-2D를 이용하여 성형공정을 해석하되 AFDEX-2D는 2차원 문제 또는 축대칭 문제의 해석만이 가능하기 때문에 위 4단계 공정 중 축대칭이 성립되는 1단계와 2단계 공정을 시뮬레이션하여 성형공정을 해석하여야만 한다. 이러한 축 대칭으로의 근사화 해석은 정확한 3차원 문제의 해석과는 거리가 있지만 2차원 해석 기능만 있는 팩키지로도 근사적으로 실제 공정을 예측 할 수 있다는 점에서 유용하게 활용할 수 있다.[3,4]

3. 소재의 변형저항

3.1 소성 변형시의 재료거동

냉간 단조 시뮬레이션에 필요한 소재의 변형 저항은 $\sigma = a(b+e)^C$인 형태로 가정하고, 이 식의 상수 a, b, c를 구하기 위하여 단조용 소재의 인장시험을 실시하였다. 이 시험으로부터 얻어진 소재의 공칭응력-공칭변형도 data를 AFDEX/MATDB에서 제공하는 진응력-진변형도 선도로 커브 핏팅하여 위 변형저항식의 상수를 결정하였다. 단축 인장시험이므로 축방향 진응력과 진변형도는 바로 유효응력, 유효변형도에 대응된다. 일반적으로 유효응력(σ)은 유효변형율(ε) , 유효변형율 속도, 온도, 손상 등의 함수이며 소재의 기계적 성질 또는 상태를 반영하는 함수이다. 따라서 모든 소재에 대한 역학적 이론은 동일하나 변형저항식이 달라진다. 냉간가공 공정의 경우 변형저항식은 유효변형율 만의 함수로 간주할 수 있으며 인장시험을 이용하여 그 관계식을 얻을 수 있다. 그러나 소재의 성분과 조성이 같더라도 생산자나 생산 로트에 따라서 변형저항식이 조금씩 다를 수 있으므로 현장에서 사용되는 소재로부터 실험치를 확보하여 시뮬레이션하여 사용하는 것이 바람직하다.

3.2 공칭응력/공정변형률과 진응력/진변형률의 관계

인장시험용 시편의 원래 표점거리를 L_0, 변형후의 표점거리를 L이라 하면 공칭변형율과 진변형율의 관계는 다음과 같다.

공칭변형율과 진변형율에 대한 정의에 따르면 공칭변형율은 $e=\frac{L-L_0}{L_0}=\frac{L}{L_0}-1$, 또는 $\frac{L}{L_0}=1+e$가 얻어지며 진변형율(ε)은 $\varepsilon=\int_{L_0}^{L}\frac{1}{L}dL=\ln\frac{L}{L_0}$이 되는데 여기에 길이의 비를 대입하면 진변형율은 식 1과 같이 공칭변형율의 함수로 표시된다.

$$\varepsilon=\ln\frac{L}{L_0}=\ln(e+1) \tag{1}$$

시편의 변형 전 단면적을 A_0, 변형 후 단면적을 A, 시편에 가해진 하중을 P라 하면 공칭응력 (S)$=\frac{P}{A_0}$, 진응력 (σ)$=\frac{P}{A}$이다. 또한 진응력식을 변형하고 여기에 변형전·후의 체적이 일정하다는 조건, 즉 $AL=A_0L_0$, 또는 $A_0/A=L/L_0$ 임을 고려하여 위의 결과를 대입하면 식 2와 같이 된다.

$$\sigma=\frac{P}{A_0}(e+1)=S(e+1) \tag{2}$$

또한 소재의 변형저항식 $\sigma = a(b+e)^C$에서 세 상수 a, b, c를 구하기 위하여 인장시험에서 얻어진 공칭응력-공칭변형율 자료를 AFDEX/MATDB 프로그램에 입력하여 a, b, c 값을 구한다.

표 1에 AFDEX 에서의 여러 형태의 변형저항식을 표시하였으며, 표1에서 Y_0는 인장시의 초기항복응력이며, $f(x)$는 손상도의 영향을 고려하기위한 함수이다.[5]

[표 1] 변형저항식
[Table 1] Deformation resistance formular

1	$\sigma = Y_0(1+\frac{e}{b})^a$
2	$\sigma = Y_0(1+\frac{e}{b})^a * f(x)$
3	$\sigma = ae^b$
4	$\sigma = ae^b * f(x)$
5	$\sigma = a+be^c$
6	$\sigma = (a+be^c) * f(x)$

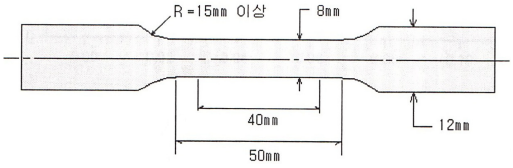
4. 인장 시험

인장시험의 소재는 SCM435이며 화학적인 성분 조성은 표 2와 같다.

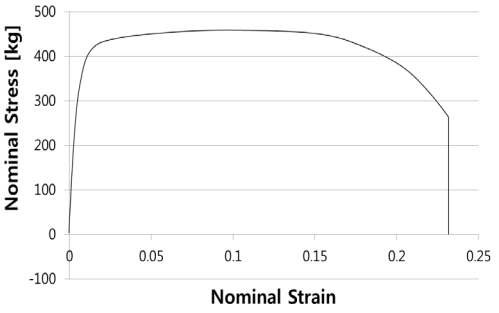
[표 2] SCM435 볼트의 화학적 성분 조성(%)
[Table 2] Chemical composition of SCM435 bolt

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.33~0.38	0.15~0.35	0.60~0.85	0.03 이하	0.03 이하	0.9~1.2	0.15~0.03

인장시험용 시편은 그림 2와 같이 KS B 0801의 14A의 시험편을 따랐으며, 30개의 시험편을 제작하여 시험하였다.

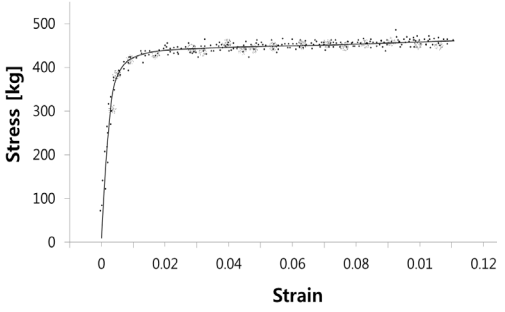


[그림 2] 인장시험편 형상
[Fig. 2] Shape of tension test piece



[그림 3] 공칭응력-공칭변형율 선도
[Fig. 3] Nominal stress-strain curves

인장시험에서 얻어진 공칭응력-공칭변형도 선도와 이를 Least Square 방법으로 핏팅하여 얻은 진응력-진변형율 선도는 그림 3, 그림 4와 같다.



[그림 4] 진응력-진변형율 선도
[Fig. 4] Real stress-strain curves

[표 3] 상수값(시편 30개)
[Table 3] Value of constant

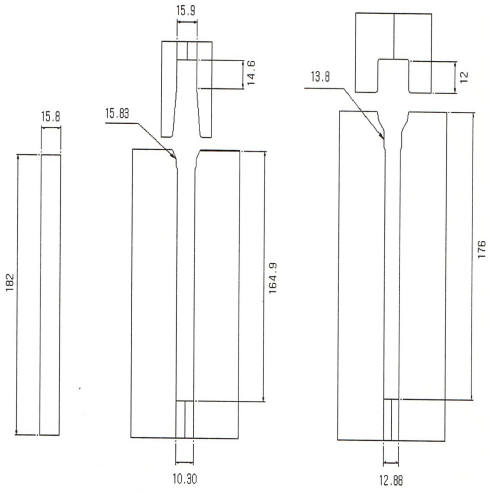
	$a_i(N)$	b_i	c_i
1	838.15	0	0.183
2	883.03	0	0.96
. . .	. . .	. . .	. . .
30		0	0.183
단순평균	828.72	0	0.186
곡선 핏팅값	834.87	0	0.183

SCM435 재료의 각 시험편에서 얻은 상수 a, b, c의 값과 30개 시험편 data를 단일 data군으로 묶어서 커브 핏팅한 변형저항식의 상수값을 표 3에 표시하였다.

5. Torsion bar bolt의 시뮬레이션

Torsion bar bolt의 4단계 공정 중에서 축 대칭이 성립하는 2단계까지의 유한요소법 해석을 실행하여서 적정 여부를 검토한 후에 적절한 수정을 하고 1, 2단계 공정을 재해석하였다.

그림 5에 1, 2단계의 다이 형상을 표시하였다.



[그림 5] 1, 2단계의 다이 형상
[Fig. 5] Shape of Dies at first and second steps

5.1 성형공정 중 1, 2단계까지의 해석 및 검토

초기에 설계된 4단계 공정은 1단계와 2단계에서 주로 압출공정이 이루어지며, 1단계 압출부에서 단면감소율은 23.7%이고 2단계 압출부에서의 단면감소율은 12.9% 이다. 또한 1, 2단계 성형에서 문제점이 발생하면 이에 대한 해결이 선행되어야 하기 때문에 1단계와 2단계에서의 소재의 유동해석을 먼저하고 적정여부를 검토한 후에 3단계와 4단계의 성형을 할 수 있다.

5.1.1 초기 2단까지의 접촉압력 해석

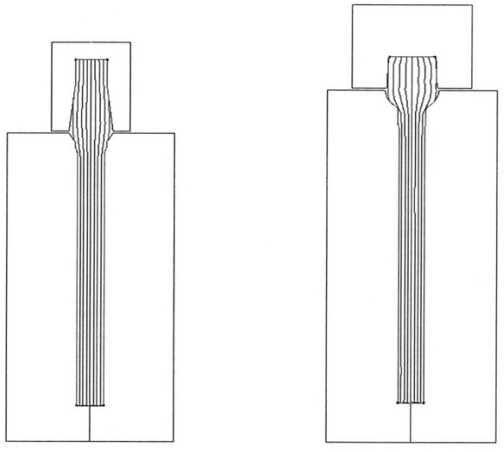
4단계 중 공정 초기 단계인 1단계와 2단계에서의 금형과 소재간의 최대 접촉압력은 표 4와 같이 2단계에서의 국부적인 최대 접촉압력이 $297.3kgf/mm^2$까지 비교적 높다. 접촉압력은 금형의 잔류응력과 어느 정도 상쇄된 형태로 금형에 유효응력 및 방향별 응력을 발생시킴을 알 수 있다.

[표 4] 1, 2단계의 접촉압력(kg/mm^2)
[Table4] Pressure contact at first and second steps

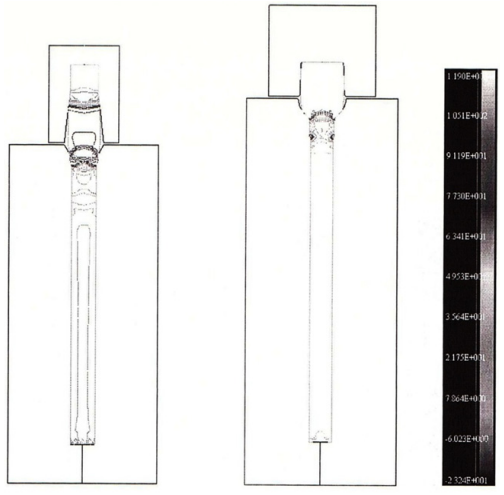
단별	1단계	2단계
압력	260.2	297.3

5.1.2 초기 1, 2단계까지의 단류선 해석

4단계 중 공정 초기 단계인 1단계와 2단계에서의 단류선은 1, 2단계 모두에서 그림 6과 같이 유선형으로 잘 형성되고 있음을 알 수 있다.



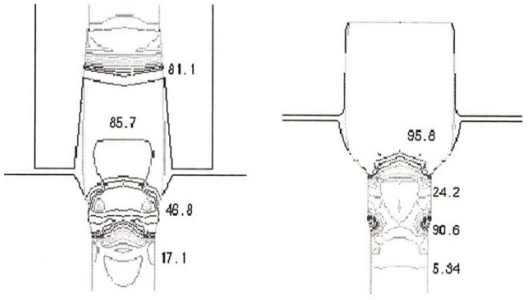
[그림 6] 1, 2단계의 단류선 해석 결과
[Fig. 6] Analysis result of flow line at first and second steps



[그림 7] 1, 2단계의 유효응력 해석
[Fig. 7] Analysis of effective stress at first and second steps

5.1.3 초기 1, 2단계까지의 유효응력(σ) 해석

그림 7에 1, 2단계 과정의 유효응력의 분포를 나타내었고 그림 8에 특히 많은 유동이 일어나는 머리부분의 유효응력 분포를 표시하였으며, 표 5는 단계별 유효응력의 최대치를 나타낸다.



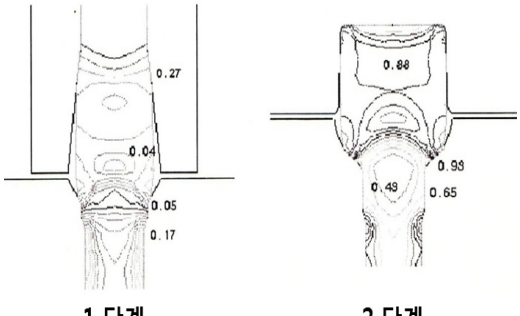
[그림 8] 1, 2단계 머리부의 유효응력 분포
[Fig. 8] Distribution of effective stress on first and second steps at bolt head

[표 5] 단계별 유효응력의 최대치(kg/mm^2)
[Table 5] The maximum value of effective stress

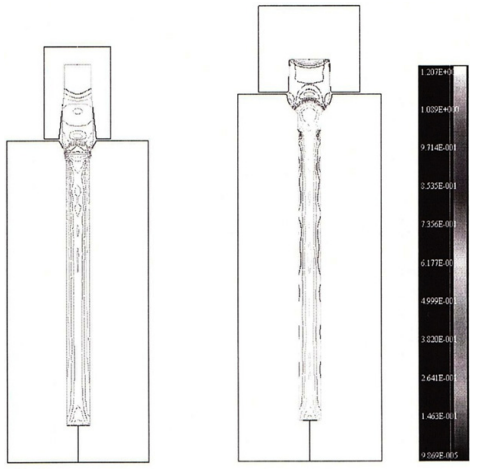
단별	1 단계	2 단계
유효응력	85.6	118.9

5.1.4 1,2단계의 유효변형율(ε) 해석

그림 9는 볼트 머리부분의 유효변형율(ε)을 나타내며 그림 10은 1단계와 2단계에서의 유효변형율의 분포를 나타내었으며 표 6은 유효변형율의 최대치를 나타낸다.



[그림 9] 1, 2단계 머리부의 유효변형율 분포
[Fig. 9] Distribution of effective strain on first and second steps at bolt head



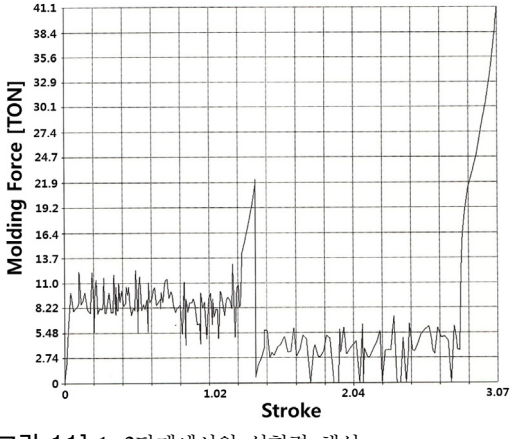
[그림 10] 1, 2단계의 유효변형율 해석
[Fig. 10] Analysis of effective strain at first and second steps

[표 6] 단계별 유효변형율 최대치
[Table 6] The maximum value of effective strain at first and second steps

단 별	1 단계	2 단계
유효변형율	0.64	1.207

5.1.5 1,2단계의 성형력과 스트로크 해석

그림 11은 1, 2단계에서의 스트로크와 이 공정에서의 성형하중을 나타낸 것이며, 각 단의 말미에서 성형력이 최대로 집중됨을 알 수 있다. 표 7은 단계별 최대 성형하중이다.



[그림 11] 1, 2단계에서의 성형력 해석
[Fig. 11] Analysis of molding force at first and second steps

[표 7] 단계별 최대 성형력 (ton)
[Table 7] Maximum molding force

단 별	1 단	2 단
성형하중	21.6	41.1

6. 결론

본 연구에서는 SCM435 Bolt의 4단 공정중 1, 2단계 공정을 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 소재의 유동 해석을 하고 그 결과를 검토하였는데 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 유한요소법으로 해석한 1, 2단계 공정은 축대칭이 성립되므로 소재의 변형 형상이 공정에서 기대 했던 치수를 만족할 수 있었다.
2. 소재에 형성된 단류선이 전 공정을 통하여 부드럽게 연속적으로 형성됨을 알 수 있었으므로, 소재 성형 뿐만 아니라 내부의 결함도 없을 것으로 예상되었다.
3. 접촉압력은 다이의 형상 변화가 큰 곳에서 큰 값을 나타내었는데, 이는 다이에서 단면감소부, 펀치에서 소재와 다이의 접촉이 끝나는 부분에서의 노치 현상으로 인한 응력집중 현상 때문으로 판단된다.
4. 기존의 1단, 2단계 공정에서 2단계에서 시행한 압출공정을 4단계로 옮기고 2단계와 3단계 공정에서는 머리부분 성형만 이루어지도록 공정을 약간 수정하면 좀 더 원활한 성형이 이루어 질 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] Cold Forging Data sheet, “Tool steel dies for the cold forging of steel”, ISME, No. 70003, 1970.

[2] S. Kobayashi, S. Oh, T. Altan, “Metal Forming and the Finite Element Method, Oxford University Press, London, 1994, 12.

[3] J. L. Frater, “Application of finite element methods to the design of prestressed tooling”, J. Master. Shaping Technol. 7, pp.49-55, 1989.

[4] J. P Domblesky, “Computer Simuiation and Die Stress Analysis”, Fastener Technology International, Dec, 1998, p.40-42.

[5] AFDEX User’s Manual 1, 2, 3; CUBICTEK, 1998.

안 교 철(Kyo-Chul Ahn) **[정회원]**

- 1983년 8월 : 단국대학교대학원 기계공학과(공학석사)
- 1996년 8월 : 아주대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 1988년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 건축설비공학과 교수

<관심분야>
기계재료, 요소설계, 위생설비

최 취 경(Chui-Kyung Choi) **[정회원]**

- 1984년 2월 : 고려대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 동국대학교 대학원 건축공학과 (공학박사)
- 1986년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 건축공학과 교수

<관심분야>
강구조, 구조시스템, 건축재료