

변형률속도 민감성을 고려한 요크 코킹공정의 해석에 의한 품질 평가

박문식[#], 강경모^{*}, 한덕수^{**}

Quality Assessment by Analysis of Yoke Caulking Process Considering Strain Rate Sensitivity

Moon Shik Park[#], Gyoung Mo Kang^{*} and Deog Soo Han^{**}

ABSTRACT

This paper is to predict quality deterioration resulting from a caulking process of yoke which is a part of automotive steering system. The caulking is a plastic deformation process involving such as impact of high speed tool, contacts between part and fixtures and strain rate sensitivity of the part material. Elaborate application of finite element method is necessary to calculate changes of part dimensions because they fall into a level of tolerances. Simple work hardening and strain rate sensitive model is proposed for the material and applied for the simulation by using Abaqus which is able to cater for elastoplastic rate sensitive material and contacts. Numerical results of test models that represent tensile bar and tensile plate are compared with material data inputs. Dimensional changes for the yoke are calculated from simulations and compared to the measurements and they show good agreement. The method presented here with the material model proved to be valuable to assess quality deterioration for similar metal forming processes.

Key Words : Yoke (요크), Caulking process (코킹공정), Contact analysis (접촉해석), Strain rate sensitivity (변형률속도 민감성)

1. 서론

자동차나 항공기 및 일반 기계의 제조 또는 조립에 있어서 품질보증의 측면은 날로 강화되고 있는 실정이다. 이러한 품질 활동들에 의해서 성능적인 측면과 가격의 측면의 국제적인 경쟁력을 실현

시키고 있으며 따라서 품질활동에서의 뒤처짐이란 곧 국제경쟁에서 뒤처지는 것임을 의미한다.

조립업체는 매우 많은 부품들로 이루어진 완성품에 대하여 품질보증을 기해야 하는데 이는 곧 부품조립품이나 부품을 공급하는 협력업체들의 품질능력에 좌우하게 됨을 의미한다. 따라서 조립업체는

... 2003년 1월 15일 접수
교신저자, 한남대학교 기계공학과
Email : moonpark@mail.hannam.ac.kr, Tel : (042) 629-8278
* 한남대학교 대학원 기계공학과
** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

외주관련 정책결정에 있어서 품질보증에 최적화 된 체계적인 기술을 가져야함은 물론이다. 그리고 부품을 공급하는 협력업체들도 조립업체로부터 하달된 공학적 임무와 품질적 활동을 보다 체계적으로 하여야 한다¹.

품질의 척도로서 통계적 공정관리기법과 아울러 공정능력비(Cpk)를 사용하는데 이것은 평균을 고려한 제품규격범위를 6σ ($6 \times$ 표준편차)로 나눈 값으로서 그 값이 1.0 이상이면 능력이 있다고 말한다. 그러나 선진국의 기계업계에서는 6σ (불량률 0.27%에 해당함)를 넘어서 8σ 즉, $Cpk = 1.33$ 이상을 추구하고 있는데 이는 불량률 63 ppm(0.0063%)을 의미한다².

만약 부품제조단계에서 공정능력비 1.33을 달성하고자 한다면 이는 절삭가공은 물론 소성가공이나 여타 단위공정에서의 엄격한 공차관리를 해야 함을 의미한다. 여기에는 온도의 영향, 치구나 고정구의 위치, 가공의 순서, 소성변형에 의한 영구변형 또는 스프링백 현상등의 정량적 평가등이 포함된다³. 본 연구는 이러한 맥락에서 자동차 조향시스템에 들어가는 부품인 요크(yoke)의 코킹(caulking) 소성공정을 대상으로 하여 유한요소해석에 의해 중요 치수의 변화를 정량적으로 계산하고 이를 이용하여 부품의 품질을 개선하는 방향으로 공정을 개발하는 과정을 제시한다.

본 공정을 모델링하고 계산함에 있어서 야기되는 문제점들에는 빠른 속도로 움직여 충격을 가하게 되는 공압실린더와 코킹 톨의 동특성, 부품을 지지하고 고정하는 지그나 고정구들과의 접촉해석, 변형률속도에 의존하는 부품의 재료특성, 공차수준의 영구변형을 신뢰할 만한 수준으로 계산해내기 위한 유한요소 모델링상의 고려 등이다.

과도응답해석을 필요로 하는 동특성의 관점은 여기서는 변형이 끝난 후의 현상에만 관심이 있으므로 평균적인 가정을 도입한 준정적 해석에 의해 만족할 수가 있다. 따라서 공압실린더의 시간이력에 따른 용량특성, 톨의 질량특성등에 대한 모델링 및 해석은 하지 않아도 되었다.

적절한 접촉모델링과 원하는 변형거동을 구하기 위한 유한요소 모델링은 비선형 유한요소 해석 톨인 Abaqus를 사용한 경험을 바탕으로 신중한 요소망 생성에 의해서 달성된다. 본 연구에서는 변형률속도에 의존하는 재료의 거동과 유한요소해석

을 접목하였는데 여기에는 기존의 연구나 자료가 충분하지 못하므로 문헌조사 및 적절한 모델의 개발을 필요로 한다.

금속재료는 소성변형이 진행됨에 따라 유동응력(flow stress)이 증가하는 가공경화현상을 보인다. 이러한 거동은 인장시험에 의해 쉽게 얻을 수가 있다. 또한 유동응력은 변형률속도(strain rate)와 온도에도 따라 변하는데 변형률속도가 높을수록 증가하며 온도가 높을수록 감소한다⁴. 특히 변형률속도 민감성은 온도가 높을수록 커지는데 열간가공에서는 매우 크다.

변형률속도 민감성을 고려한 재료모델에는 변형률속도에 대한 지수함수모델과⁴ 자연로그함수 꼴의 Johnson-Cook 모델⁵이 있다. 그러나 재료마다 각기 다른 거동을 보이므로 일반적으로 쓰일 수 있는 모델은 드물다. 변형률속도 민감성은 고체내의 응력파를 이용한 실험법인 Hopkinson Bar 시험법⁶이 개발된 이래로 여러 가지 변형률속도의 범위에 대해서, 그리고 여러 가지 재료 및 시편에 대하여 연구가 진행되어 왔다. 예를들어 AISI 4340 강에 대하여⁷, Fe-28Al 합금에 대하여⁸, 자동차용 냉연강판에 대하여⁹, 구조용 알루미늄 봉 2011-T3 및 7075-T6¹⁰에 대하여 변형률속도 민감지수를 실험에 의하여 구하였다.

본 연구에서는 일반적으로 잘 알려진 연강에 대하여 가공경화지수 및 변형률속도 민감도가 이미 알려져 있다고 가정하고 간단한 변형률속도 지수함수모델을 이용하여 요크 재료를 모델링할 것이다. 그리고 이 재료 데이터를 Abaqus의 변형률속도 민감 물성치에 입력하고 간단한 인장봉과 판시편에 대해 해석함으로써 재료의 거동을 검증한다. 그리고 그러한 재료데이터를 갖는 요크에 적용하여 비선형 탄소성 접촉해석을 수행한 후 그 결과를 분석하여 치수변화에 의한 품질효과를 평가할 것이다.

2. 코킹공정의 개요

요크는 자동차의 조향계통에 들어가는 유니버설 조인트 부품의 하나이다. 도면 Fig. 1(a) 정면도를 기준으로 볼 때 좌·우 베어링구멍에는 스파이더(spider)가 니들베어링과 함께 조립되며 상부(목부분) 세레이션(serration) 구멍에는 조향축이 조립되어 체결된다.

코킹공정에서는 스파이더를 조립하고 조립된 스파이더가 축방향으로 움직이는 것을 막기 위하여 국부적인 소성변형을 가함으로써 스파이더의 바깥쪽에 요크 베어링구멍의 내면을 축소시켜 막음장치를 하는 것이다. 시험용 코킹공정의 개략도를 Fig. 1(c)에 나타내었다. 장비의 중앙에 공작물인 요크가 클램프 및 고정구에 의해 Fig. 1(b)와 같이 고정되며 양쪽의 코킹툴이 압입실린더의 힘을 받아 요크의 베어링구멍 바깥부분 상·하를 가압하여 코킹이 이루어 진다.

본 공정 이후의 공정은 세레이션부에 축을 조립하여 체결하는 것으로서 본 공정을 수행한 후에도 공차가 유지되어야 한다. 그러나 코킹공정이 국부적인 소성을 일으키는 것이라 할 지라도 코킹툴당 2800 kgf의 힘이 가압되므로 인해 요크의 전체적인 부분에 걸쳐 소성변형을 유발하며 특히 베어링 구멍과 세레이션부의 치수의 변화가 품질에 큰 영향을 미치게 된다. 세레이션부의 치수변화가 심하면 후공정인 축조립이 불가능하여 결품처리되며 베어링 구멍이 진원도상에서 크게 벗어나면 베어링이 흔들리거나 이탈되는 파손이 일어날 수도 있는 것이다. 따라서 본 연구에서는 코킹공정 해석을 통해서 요크의 치수변화를 예측하고자 한다.

3. 변형률 속도 의존 소성 모델

3.1 재료 모델

일반적으로 금속재료의 소성가공 중에는 큰 변형을 수반하고 변형률-응력의 관계식으로는 변형경화를 나타낼 수 있는 다음의 식이 쓰인다.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

여기서 σ 는 유동응력, ε 은 진변형률을 의미하며, K 와 n 는 재료상수로서 각각 강도계수 및 가공경화지수라 한다. 이러한 재료상수들은 실험에 의하여 대수그래프를 그린 후 그 절편과 기울기 값을 재는 방법으로 구한다⁴.

본 연구에서는 이러한 상수들을 실험에 의해 직접 구하는 대신 근사적인 방법으로서 일반적으로 더 잘 알려진 항복점(yield point: S_{yp})과 극한인장강도(ultimate tensile strength: S_U)의 두 점의 값만을 이

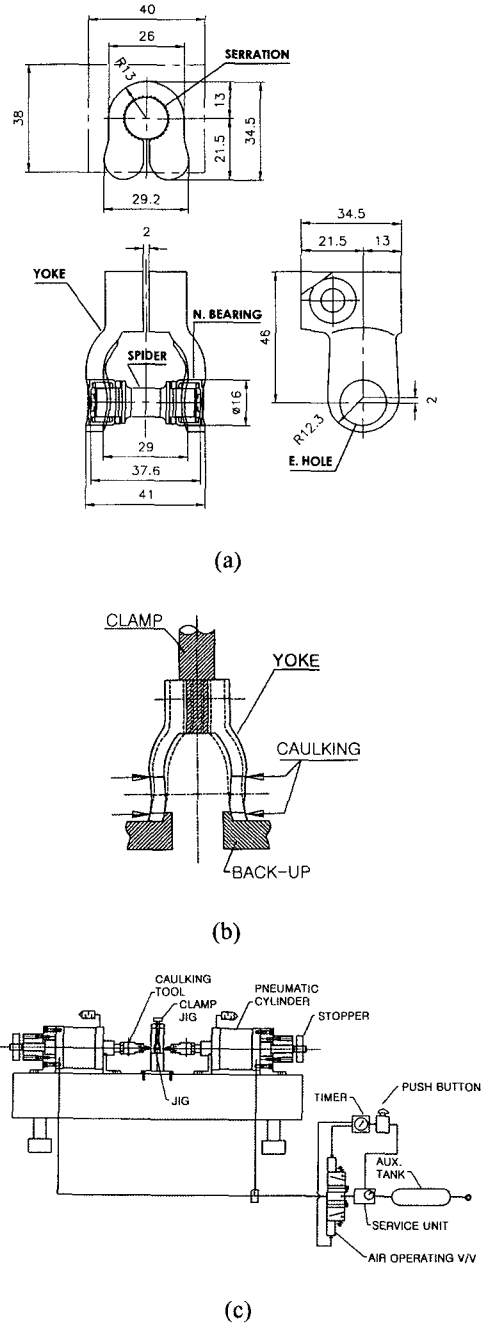


Fig. 1 Yoke caulking process (a) Part drawing (b) Clamping and fixture schematic (c) Pneumatic process testing layout

용하여 피팅(fitting)으로 구하기로 한다. 여기서 항복점과 극한강도 값은 식(1)에서와 같은 진응력으로 주어지는 것이 아니라 공학적응력(engineering stress)으로 주어진 값이다. 인장시험에서 진값과 공학적값의 두드러진 차이는 네킹(necking) 이후의 소성변형이므로 네킹 훨씬 이전 또는 탄성변형영역에서의 두 값의 차이는 미미하다. 따라서 항복점에서는 식(1)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{YP} = K\sigma^n \quad (2)$$

여기서 $\sigma = 0.002$ 로서, 저탄소강 또는 알루미늄 등에서 항복점에 대응되는 0.2% 변형률 값으로서 본 연구에서 다루는 재질이 열간압연 연강판이므로 적용이 가능하다. 또한 극한점에서의 진변형률이 $\epsilon = n$ 이고 진응력-공학적응력의 관계식이 $\sigma = S \exp^{\epsilon}$ 임을 이용하면 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_U = S_U \exp^n = Kn^n \quad (3)$$

따라서 식(2)로부터 K 를 구하고 식(3)에 대입하여 정리하면 다음의 비선형 방정식을 얻는다.

$$S_U \exp^n = (S_{YP}\sigma^{-n})n^n \quad (4)$$

이 비선형 방정식을 풀면 가공경화지수 n 값을 얻을 수 있고 구한 n 값을 식 (2)에 대입하면 K 값을 얻을 수 있다.

본 연구에서 다루는 재료는 열간압연 연강판으로서 규격 KS D 3501-83 기호 SPHE 로서 항복점 164 MPa (17 kg/mm²), 극한인장강도 275 MPa (28 kg/mm²)를 사용하였으며, 위에서 기술된 피팅 절차에 의하여 구한 재료상수의 값은 $n=0.153$, $K=426$ MPa 이다. 이렇게 구해진 진응력-진변형률의 그래프를 Fig. 2에 나타내었다.

변형률속도에 의존하는 재료모델은 여러 가지로 많으나 본 연구에서는 변형률 속도와 관련된 특성이 변형률에는 무관하고 유동응력이 변형률 속도에 지수적으로 비례한다는 다음 모델을 이용하기로 한다⁴.

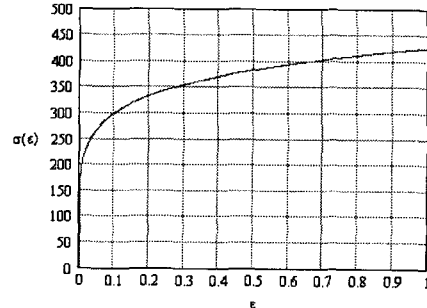


Fig. 2 True stress - true strain curve for the material

$$\sigma = C\dot{\epsilon}^m \quad (5)$$

여기서 C 는 강도계수이며 m 는 변형률속도 민감지수로서 실험에 의해 구해지는 값이다.

변형률속도에 의존하는 재료의 모델은 고속도의 충돌현상의 해석에도 사용이 되지만 주로 소성가공 공정의 해석에 이용된다. 특히 열간가공의 경우 변형률속도계수의 영향이 매우 큰 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 냉간의 코킹공정을 다루므로 문헌⁴에서 $m=0.05$ 를 사용하기로 한다.

식 (1)과 (5)를 이용하여 수치해석을 하기 위해서는 먼저 식 (5)는 정적인 상태($\dot{\epsilon}=0$)에 대하여는 맞지 않으므로 정적영역의 한계값을 이용하여 근사화할 필요가 있다. 변형률속도가 어느 정도 이하가 되면 거의 정적이라 할 수 있으므로 여기서는 $\dot{\epsilon}=1$ 을 경계 값으로 생각하고 이 값을 식 (1)과 연결시켜서 극한인장강도를 쓰면 다음과 같다.

$$\sigma_U = C(1)^m = Kn^n = 320 \quad (6)$$

그러므로 식 (6)에서 $C=320$ MPa 을 얻는다. 이 값과 변형률속도계수 값을 이용하여 변형률속도에 따른 극한인장강도를 다음과 같은 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\sigma_U(\dot{\epsilon}) = C(\dot{\epsilon})^m \quad (7)$$

식 (7)을 이용하면 임의의 변형률속도에 대한 극한인장강도를 얻을 수 있고 여기서 얻어진 극한인

장강도를 식 (3)에 대입하면 변형률속도에 대응하는 K 값을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$K(\dot{\epsilon}) = \sigma_U(\dot{\epsilon})n^{-n} \quad (8)$$

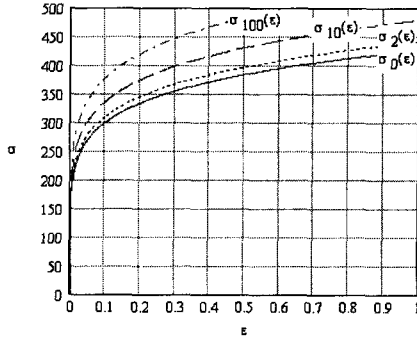


Fig. 3 Stress-strain rate curve for the material SPHE

그러므로 식 (7)과 (8), 식(1)을 이용하면 임의의 변형률속도에 대한 응력-변형률의 선도를 얻을 수 있고 변형률속도의존 소성변형해석을 할 수 있게 된다. 이러한 절차에 의하여 $\dot{\epsilon} = 0.2, 10, 100$ 에 대한 응력-변형률 선도를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 $\sigma_{\dot{\epsilon}} = \sigma(\dot{\epsilon})$ 과 같은 표기법이 사용되었으며 σ_{10} 은 $\dot{\epsilon} = 10$ 에서의 진응력 값을 의미한다.

3.2 재료모델 검증 유한요소 해석

본 연구에서 요크의 코킹공정을 3차원 유한요소 탄소성 접촉문제에 모델링하여야 하므로 먼저 재료부분에 대한 해석 툴(Abaqus)의 검증이 이루어져야 한다. 수치검증은 Fig.3과 같은 물성치를 입력하였을 때 시편과 같은 간단한 모델에 대한 해석을 통하여 출력되는 값을 비교하여 봄으로써 확인할 수 있다.

수치검증용 문제는 인장시편을 본 뜬 Fig. 4(a)와 Hopkinson-type 판시편을 본 뜬 Fig. 4(c)를 사용한다. 수치해석에서는 물리적 시험과는 달리 충격과 같은 하중을 줄 때 발생하는 관성효과를 완전히 배제한 상태로 해석이 가능하므로 시편의 다른 부분을 배제하고 인장시편은 1개의 트리스 요소로, 판 시편은 대칭성을 고려하여 1/4부분을 6×6 개의 평면응력 요소로 이상화하였다.

입력된 물성치가 거동해석에 의한 결과치와 같

음을 보일 수 있는 빠른 방법은 변위경계조건을 시간의 함수로 적용하는 방법이다. 만약 경계조건을 시간에 따라 Fig. 4(b)와 같이 적용한다면 이에 따른 변위 (δ), 속도 (v), 변형률속도 ($\dot{\epsilon}$)는 다음과 같다.

$$\delta(t) = \delta_0 f(t) \quad (9a)$$

$$v = \delta_0 \frac{df(t)}{dt} = \frac{\delta_0}{t_0} \quad (9b)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} \epsilon = \frac{v}{L} \quad (9c)$$

그러므로 변형률속도를 증가시키려면 다른 값은 그대로 두고 식 (9b)에서 t_0 값을 줄이면 된다. Abaqus에서 변형률속도가 없는 재료의 소성특성은 *PLASTIC 카드 아래에 소성응력-소성변형률 즉, 유동응력 값을 줌으로서 곡선형태의 관계식을 입력할 수 있다. 단, 소성변형률의 첫 번째 값은 항복점에 해당하는 값으로서 반드시 0이 들어간다. 즉 Abaqus에서는 항상 탄·소성해석을 하므로 항복점까지는 소성변형률이 없는 것이며 항복점 이후에는 탄성변형률과 소성변형률이 동시에 발생하며 변형이 커지면 탄성변형률은 소성변형률에 비해 그 값이 매우 작아지게 된다. 변형률속도에 의존하는 재료의 소성특성은 *PLASTIC, RATE= $\dot{\epsilon}$ 카드로 수개가 입력되며 임의의 변형률속도에 대한 값은 보간법에 의하여 프로그램 내부에서 계산된다. 또한 진변형률-진응력을 얻기 위해서는 기하학적 비선형 파라미터인 NLGEOM을 써서 *STEP, NLGEOM 카드를 이용해야 한다. 또한 *PLASTIC 카드에서의 소성변형률은 식 (1)의 변형률이 0.2% 이하에서의 값은 의미가 없고 응력은 탄성계수에 의해 계산되므로 전체 응력-변형률 관계식은 탄성부분에서 ($\epsilon < 0.002$) 직선, 소성부분에서는 ($\epsilon \geq 0.002$) 식 (1)의 곡선에 해당한다.

시편 모델에 대한 입력 값과 해석결과 값을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 탄성부분은 직선으로 나타나 있으며 소성부분은 곡선으로 나타나 있다. 변형률속도를 0(정적), 2, 4, 8, ..., 128 까지 변화시켰으며 0 및 128에서는 입력과 출력을 같이 나타내었는데 잘 일치함을 알 수 있다. 그 사이의 값도 모두 잘 일치하며 입력값은 나타내지 않았다. 진응력-진변형률을 얻기 위해 정적인 경우($\dot{\epsilon} = 0$)에 한해

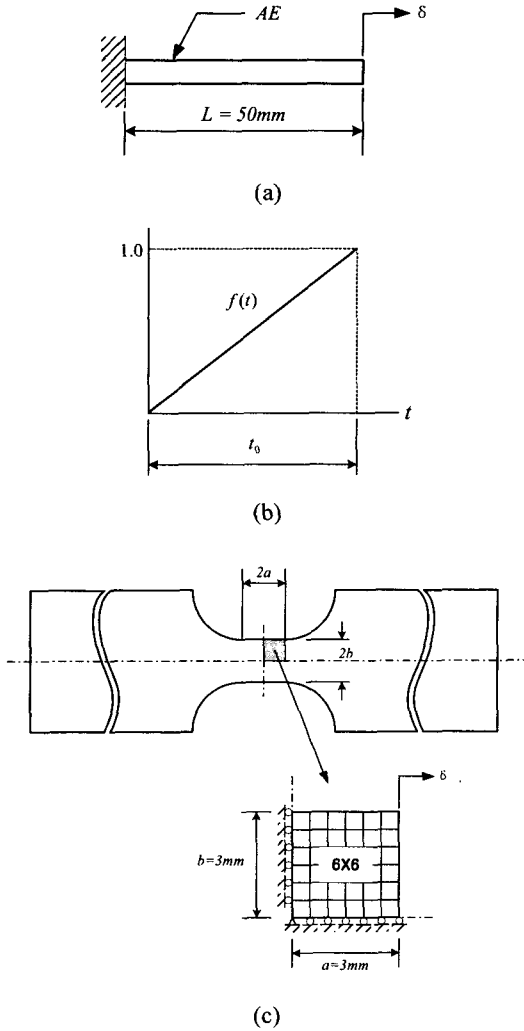


Fig. 4 Test specimen and FE sub-model (a) Tensile specimen (b) Amplitude-time curve (c) Hopkinson-type plate specimen

NLGEOM 파라미터를 쓴 값을 비교하여 표시하였는데 그래프의 x 축 범위가 $\epsilon=0.2$ 이하이므로 매우 근접하여 식별이 되지 않을 정도로 일치하여 보인다. 따라서 Abaqus의 *PLASTIC, RATE 카드는 변형률속도에 의존하는 응력-변형률 관계식 (5) 및 (1)을 입력하기에 타당하며 아주 크지 않은 변형률의 범위에서는 복잡한 3차원 탄·소성 접촉모델 해석시의 추가적인 계산시간을 수반하는 NLGEOM

파라미터를 사용하지 않고도 원하는 변형률속도의 존의 거동을 얻기에 충분하다고 판단된다.

인장시편 모델과 Hopkinson-type 판시편 모델에 있어서 동일한 변위경계조건 및 시간증분을 사용하므로 요소에서 출력되는 결과치는 서로 정확히 동일하게 Fig. 5와 같다. 따라서 하나의 그래프가 두 가지의 결과를 나타내고 있다.

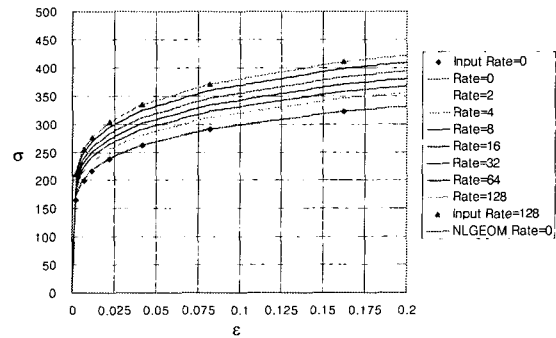


Fig. 5 Input and output stress-strain curves for the numerical test specimens

4. 요크의 코킹공정 해석

4.1 솔리드 모델링 및 유한요소 모델링

본 연구의 목적상 해석상의 주요 인자는 하중과 재료모델과 요크의 기하학적 모델링 및 코킹공정의 접촉모델링이다. 3차원 솔리드 요소망에 여러 부위가 접촉하고 있으며 재질이 비선형이라는 점을 고려하면 이 수학적 모델은 아주 복잡하며 적절한 시간내에 유용한 결과를 얻기 위해서는 여러 가지를 고려해 보아야 할 것이다.

코킹틀이 요크를 가격하여 접촉을 시작할 때부터 코킹이 끝나는 사이를 보면 공압 가격의 경우에 있어서 매우 짧은 시간안에(0.01초~0.001초) 약 1 mm 정도의 소성변형을 유발한다. 접촉이 시작되는 점에서의 틀의 속도는 압입실린더의 접근속도이며 그 속도는 요크의 변형저항에 의하여 점점 줄다가 코킹행정의 최대변형(상사점)에서는 0이 된 후 후퇴가 시작되고 요크는 일부 스프링백(springback)이 된다. 즉 변형률속도의존성에 중요한 것은 틀의 속도인데 이 속도는 접근시 v_0 였다가 상사점에서는 0이 된다. 본 연구에서는 코킹공정의 순간적인 거

동보다는 총 공정이 끝나고 난 후의 전체 거동에 관심이 있으므로 코킹속도를 평균값 $\bar{v} = (v_0 + 0)/2$ 으로 근사화하여 Fig. 4(b)와 같은 시간이력을 이용하기로 한다.

$$v_0 = 1300 \text{ mm/sec}, \quad \bar{v} = 650 \text{ mm/sec} \quad (10)$$

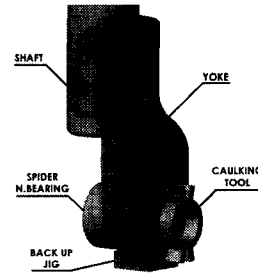
본 요크 부품은 프레스 성형품이므로 Fig. 6(a)의 사진에서 보는 바와 같이 곡면으로 이루어져 있다. 사진에서 요크의 어깨 사이에 놓여 있는 부품이 니이들 베어링부를 갖는 스파이더이며 분해되어 있는 모습이다(Fig. 1(a)참조). 요크를 보면 상세하게는 모떼기가 있고 세레이션부에는 스플라인 홈이 나 있으며 나사구멍에는 나사산이 있다. 그러나 이러한 세부적인 형상은 본 연구의 관심사인 세레이션구멍과 베어링 구멍의 치수변화를 계산하는데 있어서 영향이 없으므로 솔리드 모델링에서는 배제한다. 따라서 Fig. 1(a)의 도면을 기준으로 공정의 좌우 대칭성을 이용하여 요크의 반쪽을 모델링한 것과 클램프, 지그, 툴 등의 접촉을 위해 모델링한 것을 보여주는 것이 Fig. 6(b)이며 솔리드모델러로는 Solidworks를 이용하였다.

솔리드 모델링이 완성되면 곡면데이터를 IGES 파일로 추출하여 유한요소망을 생성 해 주는 Hypermesh에 넘겨준다. 요소망 생성시에는 먼저 곡면들을 정리하고 요크의 표면에 2차원 삼각형 셸(shell) 요소망을 생성한다. 표면의 요소망은 내부의 솔리드 요소망을 자동생성할 때 기준으로 쓰이게 되므로 솔리드 요소망의 질을 결정하게 된다. 요소의 크기, 분포, 두께방향으로의 갯 수 등을 바꾸어 가면서 가장 양호한 표면요소망 및 솔리드 요소망을 얻는다. 이와 같이 하여 얻어진 요소망이 Fig. 6(c)이며 요크에 대하여 총 요소 수는 9180, 절점의 수는 2625이다.

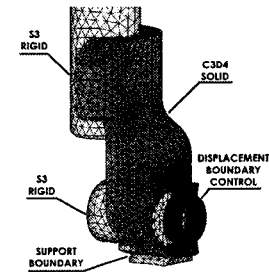
클램프, 지그등과의 접촉해석을 위해서도 동일한 방법으로 곡면데이터를 받아 표면에 2차원 삼각형 셸 요소망을 생성하고 강체로 지정하며 강체에 해당하는 부분을 master로, 요크에 해당하는 부분을 slave로 하고 접촉인터페이스를 정의하였다. 접촉해석은 비선형성이 높아 수렴속도가 늦어지는 원인이 되며 따라서 가급적 해에 영향을 주지 않는 접촉부위는 굳이 접촉 인터페이스로 하지 않아도 된다. 본 문제에서는 몇 번의 시행끝에 받침지그는 변위구속



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Yoke modeling (a) Photograph (b) Solid model (c) FE model

조건으로, 코킹툴은 조정변위로 모델링하는 것이 좋을음을 알았으며 세레이션 클램프와 스파이더 베어링은 접촉인터페이스로 하였다. 특히 접촉계면에서 master와 slave 표면이 모두 유한요소망으로 되어 있으므로 해석전에 이미 일부 절점에서는 침범 또는 이격되어 있게된다. 이 양이 커지면 초기에 과도한 소성변형이 생겨서 수렴이 되지 않는 문제가 발생하므로 접촉해석전에 절점의 위치를 약간 옮겨 주어 서로 접촉하게끔 하는데 Abaqus에서는

*CONTACT PAIR 라는 카드의 ADJUST 라는 파라미터를 지정함으로써 이러한 조정을 하게 되는데 본 해석에서는 ADJUST = 0.02 mm로 하였다.

접촉모델을 포함하여 완성된 유한요소모델은 해석기 내부적으로 생성한 것을 포함하여 총요소수=11554, 총절점수=5501, 총미지수=15006 이었다.

4.2 결과 및 분석

공압공정에 의한 요크의 코킹해석 결과를 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. 코킹률에 식 (10)과 같은 속도로 최대변위(상사점) 1.2 mm를 줄 때 요크에 의한 반력 즉, 툴하중은 2,800kgf(27,400N)으로 나타났다. Fig. 7(a)에는 툴의 상부와 하부에 걸리는 힘을 분리하여 표시하였으며 이 둘을 합한 것이 툴하중이다. 특히 툴의 상부에는 변위 0.9 mm를 지나서 하중곡선이 급하게 상승하는 부분이 있는데 이는 결과의 분석에 의하면 요크의 코킹부위가 베어링 구멍의 내벽으로 돌출되어 강체로 접촉모델링 된 베어링과 축방향으로 부딪히기 때문이었다. 또한 스프링백은 상부에서 많았는데 이는 상부가 코킹중 탄성변형이 더 많았기 때문이었다.

코킹공정 상사점에서의 von-Mises 응력과 변형된 형상을 Fig. 7(b)와 7(c)에 나타내었다. 코킹이 매우 국부적인 영역에서 일어나고 있지만 요크의 세레이션부를 포함한 많은 부분에 소성변형에 해당하는 응력이 발생되고 있음을 알 수 있다(최대 458 MPa). 이는 코킹에 의한 치수의 변화 즉 품질저하 문제를 안게 됨을 말하는 것이다.

Fig. 7(c)는 요크의 안쪽에서 변형후의 베어링 구멍을 보여주는 것인데 육안으로도 보일 정도로 구멍의 직경이 커져 있음을 알 수 있다. 베어링 구멍의 공정 후의 측면도 치수를 Fig. 8(a), 세레이션구멍의 공정 후의 평면도 치수를 Fig. 8(b)에 나타내었다. 베어링 구멍에서의 기호 Inner, Mid, Outer는 각각 두께방향에서의 안쪽, 중간, 바깥쪽을 의미하며, 세레이션 구멍에서의 기호 Top, Bottom은 각각 요크의 최상면, 세레이션부의 아랫 쪽을 의미한다. 결과에 의하면 베어링 구멍은 안쪽으로 들어갈수록 상하로 커지며 바깥쪽으로 나올수록 좌우로 커진다. 세레이션구멍은 아래로 갈수록 좌우로 커지며 위로 갈수록 앞뒤로 커진다. 이를 구멍깊이의 중간 위치에서 산출하여 요약하면 Table 1과 같다. E. Hole의 치수변화의 경향에서 보면 실제공정에서의 측정값과 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통해서 요크의 코킹공정을 대상으로 하여 부품의 소성공정에 의해서 야기되는 품질저하 요인을 계산할 수 있음을 보였다. 동역학적 모델링이 없이도 준정적인 방법으로 변형률속도 의존성을 고려할 수 있었으며 범용 비선형 유한요소 해석 툴인 Abaqus를 요크의 중요치수들의 변형량을 예측하였는데 요약하면 다음과 같다.

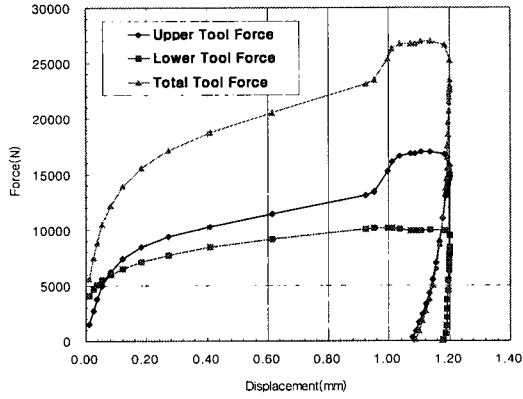
1) 변형률속도에 의존하는 재료모델로서 변형경화지수와 변형률속도계수를 이용한 간단한 지수함수 모델을 이용하였다. 구해진 재료데이터를 입력하여 코킹공정해석에 적용하고 그 결과가 실측한 값과 잘 맞음을 확인하였다. 그리고 이를 기준으로 차후에 공정이 개선되었다.

2) 중요부위의 치수로서 베어링 구멍과 세레이션 구멍의 치수변화를 해석한 결과 처음에는 진원통면이었던 구멍이 타원면으로 변하면서 확공되고 진원통도를 벗어나는 것으로 나타났다. 이는 공정능력비 $Cpk=1.33$ 이상을 달성하기 위하여서는 결코 작은 값이 아니므로 세심한 공정설비의 설계상의 고려가 필요하다고 본다.

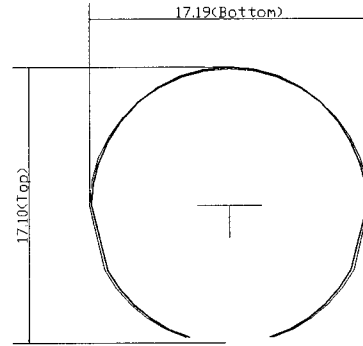
3) 요크부품의 소성공정해석에서의 어려운 점은 사면체 볼륨요소망의 생성과 접촉부위의 수렴성, 공차수준 정도의 정확한 변형량의 계산이라고 할 수 있겠다. 자동메쉬에 의존할 수 밖에 없는 사면체 볼륨요소망은 요소의 크기나 찌그러짐이 해의 수렴성 및 정밀도에 영향을 미치며 시행착오에 의하여 바로잡을 수 밖에 없었다. 본 연구에서는 요크를 제외한 모든 접촉부품은 강체로 가정하였는데 실제로는 이들 또한 탄성체이므로 본 해석상으로 나온 구멍의 변형후의 치수는 실제보다 약간 크게 나왔을 것이다.

Table 1 Hole dimensions before and after the caulking process for each holes

	E. Hole	Serration	Note
Basic dimension	φ 16.00	φ 17.00	undeformed
Height ↓	16.06 (+0.06)*	17.05 (+0.05)	* correspond to measurement value(+0.08)
Width ↔	16.52 (+0.52) §	17.08 (+0.08)	§ apparent hole opening



(a)



(b)

Fig. 8 Hole deformations (a) E. Hole (b) Serration hole

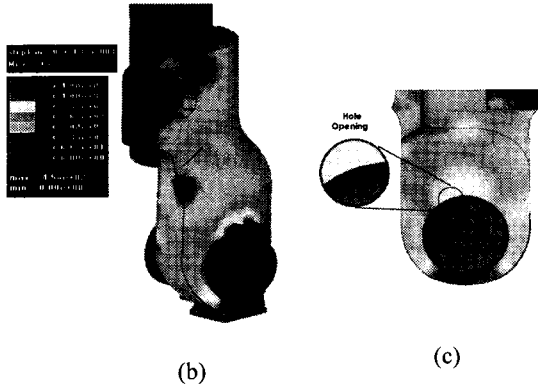
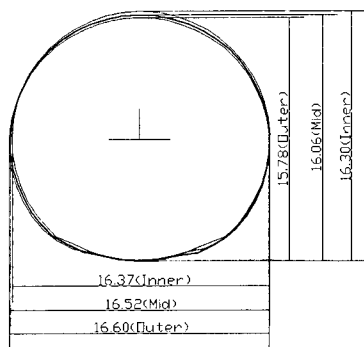


Fig. 7 Analysis results (a) Tool force - displacement curves (b) von-Mises stress at maximum deformation (c) Deformation of E-Hole



(a)

참고문헌

1. Swift, K. G., Raines, M. & Booker, J. D., "Analysis of product capability at the design stage," Journal of Engineering Design, Vol. 10, No. 1, pp. 77-91, 1999.
2. Chun Zhang & Hsu-Pin Wang, "Robust design of assembly and machining tolerance allocations," IIE Transactions, Vol 30, No. 1, pp, 17-29, Norcross, 1998.
3. Park Moon Shik, "Accurate assembly and concurrent design of airframe structures," J. of KSME(A), Vol. 24, No. 4, pp. 811-823, 2000.
4. Serope Kalpakjian, Manufacturing Processes for Engineering Materials, Addison Wesley, pp. 31-44, 1984.
5. Johnson, G. R. & Cook, W. H., "A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures," in Proceeding of the Seventh International Symposium on Ballistics, pp. 541-547, The Hague, 1983.
6. Follansbee, P. S., "The Hopkinson Bar," in Metal Handbook 9th edition, Vol. 8, Mechanical Testing, Americal Society for Metals, pp. 198-203, 1978.
7. Lee, Woei-Shyan & Yang, Gen-Wang "The plastic deformation behaviour of AISI 4340 alloy steel subjected to high temperature and high strain rate

- loading conditions," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 71, pp. 224-234, 1997.
8. Mingwei Chen, Donglian Lin, Yuanming Xia & C. T. Liu, "Strain rate sensitivity of ductility in a Fe-28Al alloy under tensile impact," *Scripta Materialia*, Vol. 37, No. 8, pp. 1243-1248, 1997.
 9. 포항종합제철주식회사, 자동차용 냉연강판의 고속 인장 특성 평가, 한국과학기술원, 1999.
 10. Yang Hyunmo & Min Oakkey, "The true stress-strain relation of aluminum alloys in the SHPB tension test," *J. of KSME(A)*, Vol. 24, No. 8, pp. 1917-1922, 2000.