

볼 조인트의 코킹 및 유격해석

황석철* · 김종규* · 서선민** · 한승호*** · 이권희***,†

* 동아대학교 기계공학과, ** (주)센트랄

Caulking and Gap Analysis for a Ball Joint

Seok Cheol Hwang*, Jong Kyu Kim*, Sun Min Seo**, Seung Ho Han*** and Kwon Hee Lee***,†

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.,

** Central corporation.,

*** Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received February 11, 2011 ; Revised July 8, 2011 ; Accepted July 11, 2011)

Key Words : Ball Joint(볼 조인트), Caulking Analysis(코킹 해석), Dynamic Analysis(동역학 해석), Gap Analysis(유격 해석)

초록: 볼 조인트는 두 요소 사이에서 회전 및 이동이 원활하도록 돕는 역할을 하는 기계요소이다. 본 연구의 대상인 볼 조인트는 중대형 승용차량용 볼 조인트로서 너클과 컨트롤 암의 운동을 돕는다. 본 연구에서는 볼 조인트의 공정 및 시험에 관한 해석 방법을 제안하고자 한다. 볼 조인트의 제작공정은 플러깅 공정과 스피닝 공정으로 나눌 수 있다. 볼 조인트의 제작공정 및 성능시험을 암시적 수치 적분법을 적용한 상용 동역학 프로그램인 NX DAFUL 2.0 을 사용하여 해석하였다. 또한 설계요구조건을 정의하기 위하여 볼 스테드에 작용하는 응력의 평균 및 분산을 반응치로 설정하였다. 그리고 완성된 볼 조인트의 유격량을 시험하는 유격시험해석을 통해 최적의 설계를 제안하였다.

Abstract: Ball joint is a rotating and swiveling element that is typically the interface between two parts. In an automobile, the ball joint is the component that connects the control arms to the steering knuckles by playing a role of bearing. The ball joint can also be installed in linkage systems for motion control applications. This paper describes the simulation strategy for a ball joint analysis, considering manufacturing process. Its manufacturing process can be divided into plugging and spinning. Then, the interested response is selected as the stress distribution generated between its ball and bearing. In this paper, a commercial code of NX DAFUL 2.0 using an implicit integration method is introduced to calculate the response. In addition, the gap analysis is performed to investigate the fitness. Also, the optimum design is suggested through case studies.

1. 서 론

볼 조인트(Ball joint)는 현가계와 조향계를 연결하는 핵심부품으로서 조향을 위해 각 방향으로 회전할 수 있도록 돕는 역할을 한다. 또한 볼 조인트는 조향운동을 원활하게 전달하며 노면에서 전달되는 충격을 감소하는 역할을 한다. 볼 조인트는 여러 종류의 반복하중을 받고 있으며 이러한 반복하중에 의하여 균열 및 마모가 발생한다. 이

와 같은 손상은 자동차의 안전성에 문제를 초래하며 운전자의 승차감 감소, 볼 조인트의 기밀성 저감 및 현가계의 전반적인 내구성능 저하의 원인이 된다. 따라서 볼 조인트의 높은 내구 신뢰성 확보가 요구된다.

본 연구에서는 볼 조인트의 제작 공정시 및 공정 완료 후 볼 조인트의 응력상태를 공정의 진행 상황에 따라 확인하기 위하여 볼 조인트의 공정해석 방법을 제안하고자 한다. 볼 조인트의 제작공정은 코킹(Caulking)공정이라 하며, 코킹공정은 플러깅(Plugging)공정과 스피닝(Spinning)공정으로 나뉜다. 플러깅 공정은 푸셔(Pusher)를 이용하여 볼 조인트 내부 부품이 이탈되지 않도록 고정하는 공

† Corresponding Author, leekh@dau.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

정이며, 스피닝 공정은 롤러(Roller)를 이용하여 소켓을 소성변형하는 공정이다.

기존의 볼 조인트의 해석에 관한 연구^(1~2)에서는 플러깅 공정과 스피닝 공정을 독립적으로 수행한 후, 해석 결과값을 이용하여 설계 기준을 설정하고 이를 모두 만족하는 설계를 제안하였다. 이와 같은 해석방법은 크게 두 가지 단점을 가지고 있다. 첫째, 코킹 공정시 발생하는 잔류응력을 유격시험 해석시 고려할 수 없다. 둘째, 유격시험 해석시 코킹이 완료된 볼 조인트를 모델링하여 사용함으로써 볼 조인트에서 발생한 유격량을 신뢰할 수 없다. 그러나 본 연구에서 적용한 구조동역학 해석방법은 기존의 해석방법이 가지는 문제점을 해결하였다. 본 연구에서 제안하고자 하는 유한요소 해석 절차는 아래와 같다. 먼저 볼 조인트의 유한요소 해석을 위하여 CAD 모델링한다. 그 다음 코킹공정 해석을 수행하고 코킹공정 해석이 완료된 볼 조인트를 연속해서 유격시험 해석한다. 이 방법은 코킹공정 해석에서 얻어진 잔류응력 및 소성변형 형상을 유격시험 해석시 적용함으로써, 공정시 소성변형으로 인한 볼 조인트의 응력상태를 고려하여 유격시험 해석이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 구조 동역학 해석방법은 해석 수행시 소요되는 시간이 길다는 문제를 가지고 있다. 이러한 문제를 암시적 수치 적분 방법을 사용하여 해석하는 상용프로그램 NX DAFUL2.0 을 이용하여 해결하였다. 일반적으로 구조 동역학 해석시 암시적 적분 방법이 명시적 적분 방법에 비해 계산 시간이 많이 소요된다. 그러나 비선형 접촉 문제가 있는 기계 시스템의 해석에서는 암시적 적분 방법이 명시적 적분 방법에 비하여 수렴성이 우수하기 때문에 전체적인 해석 수행 시간이 빠를 수 있다.^(3,4) 본 연구에서는 기존의 방법으로 불가능했던 코킹공정 해석을 구조 동역학 방법을 이용하여 해석하였고, 코킹공정 해석과 유격시험해석과정을 연속적으로 수행함으로써 유격시험해석에 대한 신뢰성을 확보하였다. 또한 제안된 모델 중 우수한 모델을 선정하기 위하여 볼 조인트의 주요 설계변수를 설정하고 설계 요구조건을 만족하는 설계를 제시하였다.

2. 볼 조인트의 유한요소해석

본 연구의 해석모델은 A사에서 생산되는 중대형 승용차의 현가장치에 사용되는 볼 조인트로서 Fig. 1과 같은 위치에 사용된다. 볼 조인트는 소켓(Socket), 플러그(Plug), 베어링(Bearing), 볼 스텐드

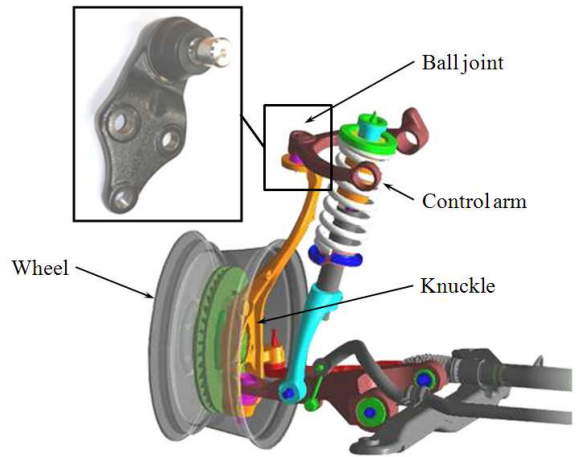


Fig. 1 Location of a ball joint

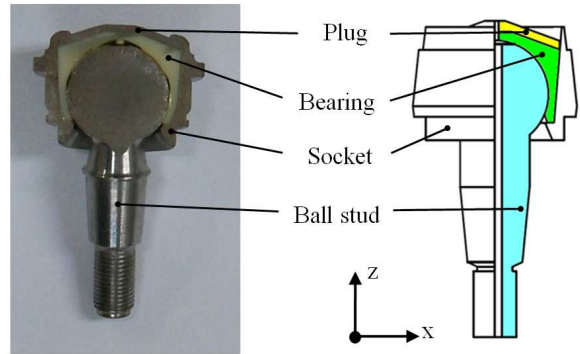


Fig. 2 Component of a ball joint

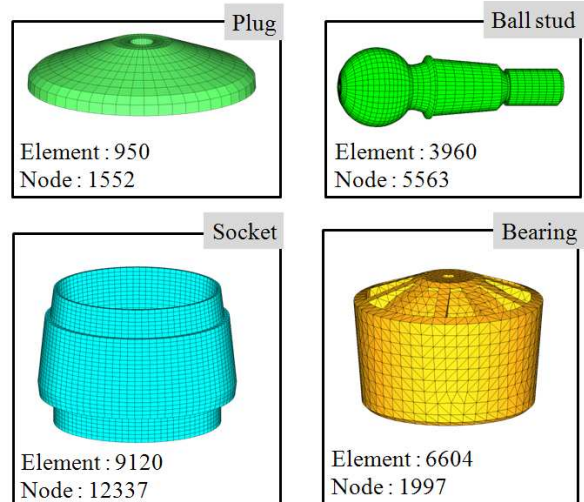


Fig. 3 FE model of ball joint

(Ball stud)의 4 가지 부품으로 구성되어있으며 부품 구성을 Fig. 2 에 표시하였다. 볼 조인트의 소켓은 가조립 된 볼 조인트의 몸체 역할을 하는 부품으로서 소성변형하여 볼 조인트의 기밀성을 유지하는 역할을 한다. 베어링은 볼 조인트의 부품 중

상대적으로 작은 강성을 가지고 있으며 볼 스테드의 운동시 윤활 및 완충작용을 한다. 플러그는 볼 조인트의 제작 및 운전시 구성 부품의 이탈을 방지하는 역할을 한다. 볼 스테드는 상단의 볼과 베어링이 조립되어 모든 방향의 회전이 가능하도록 하는 역할을 한다.

2.1 유한요소 모델링

볼 조인트의 유한요소모델은 비교적 형상이 복잡하고 정확한 형상 구현이 요구되는 베어링의 경우 Fig. 3 과 같이 사면체 요소를 사용하여 모델링하였다. 그 외 소켓, 플러그, 볼 스테드는 육면체 요소를 사용하여 모델링하였다. 또한 대변형이 발생하는 부분의 요소는 2mm 크기의 요소로 조밀하게 모델링하였다.

각 부품의 재료 물성치는 볼 조인트의 제작사인 A 사에서 수행한 인장실험을 통해 결정되었으며, 소켓 S45C, 베어링 NYLON, 플러그 SPCC, 볼 스테드 SCM435 로 이루어져 있다. 각 부품의 응력-변형률 선도를 Fig. 4 에 표시 하였다.

2.2 접촉조건⁽⁵⁾

볼 조인트의 접촉은 소켓(Master)과 베어링(Slave), 플러그(Master)와 소켓(Slave), 볼 스테드(Master)와 베어링(Slave), 플러그(Master)와 베어링(Slave)으로 구성되는 4 개의 유한요소 모델간 접촉과 롤러(Master)와 소켓(Slave), 푸셔(Master)와 플러그(Slave)로 구성되는 2 개의 강체와 유연체 접촉이 있다. 각각의 접촉면은 3 차원 면으로 표현되고 두 면사이의 접평면을 찾아 접촉점을 계산한다. 계산된 접촉점에서 침투량을 계산하여 접촉력 fn 을 구할 수 있으며 식 (1)과 같다.

$$fn = -k|\delta|^m - D\delta' \tag{1}$$

여기서 k 는 접촉 강성계수, D 는 접촉 감쇠계수, δ 는 접촉 상대 변위, δ' 는 접촉 상대속도를 나타낸다. 또한 접평면의 상대속도에서 마찰력을 아래 식 (2)를 이용하여 계산한다.

$$f_f = \mu(v)fn \tag{2}$$

여기서 μ 는 마찰계수이고, v 는 접촉점에서 상대속도, fn 은 식 (1)에서 계산된 접촉하중이다.

2.3 해석방법 및 절차

본 연구에서는 플러깅 해석, 스피닝 해석과 유격시험해석을 구조 동역학 해석을 통하여 제작 공정시 부품에 작용하는 응력분포와 공정 완료후 볼

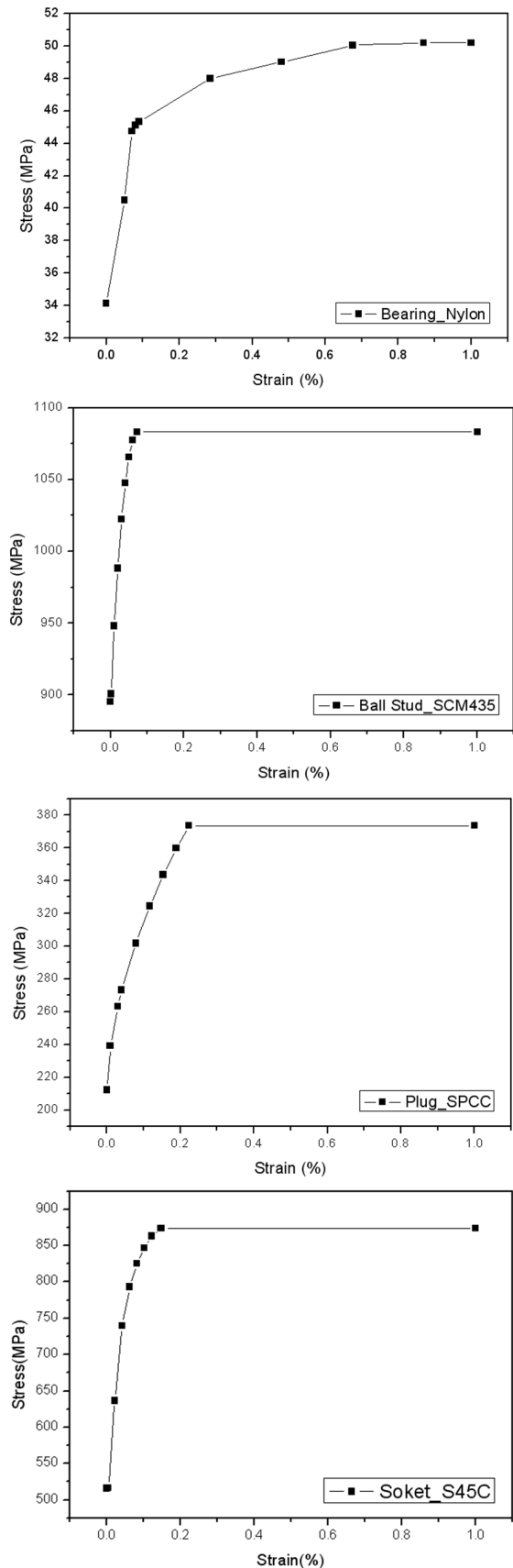


Fig. 4 Stress-Strain curve of each part

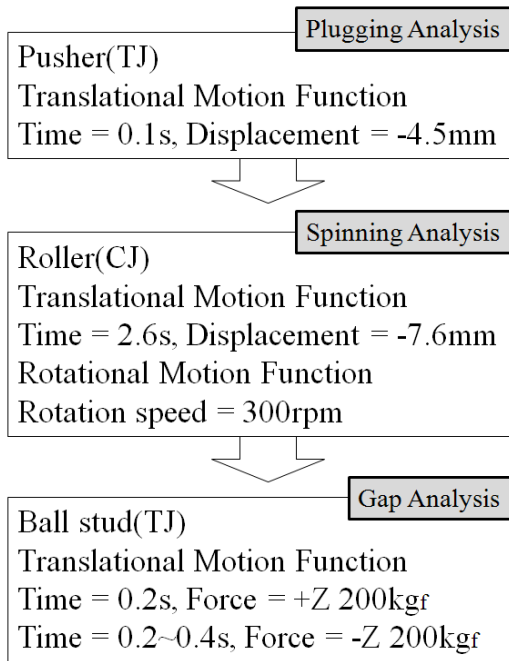


Fig. 5 Flow chart for dynamic analysis

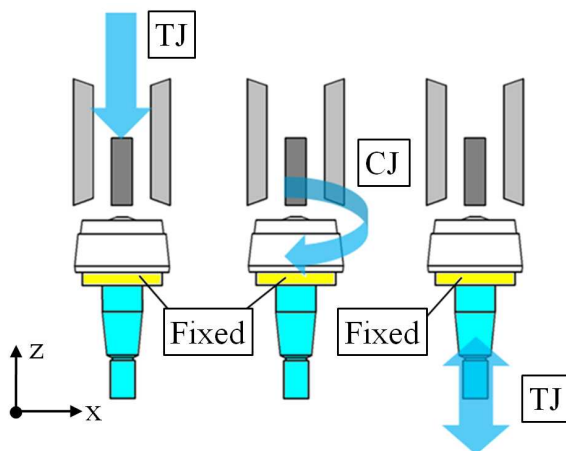


Fig. 6 Boundary conditions

조인트의 유격 시험시 변위를 확인 하였다.

볼 조인트의 해석은 플러깅 해석, 스피닝 해석과 유격시험해석의 3 가지 공정으로 구성된다. 플러깅 공정은 푸셔를 이용하여 스피닝 공정시 부품의 이탈을 방지하기 위한 공정이다. 가조립 된 볼 조인트의 소켓 아래 부분을 지그에 고정된 다음 푸셔를 0.1 초 동안 지면과 수직방향(-Z 방향)으로 4.5mm 하강시켜 베어링을 압축 변형 시키는 공정이다. 스피닝 공정은 조립된 부품이 볼 조인트 운동시 이탈되지 않도록 소켓을 소성변형하여 기밀성을 유지하도록 하는 공정이다. 이 공정에서는 2.65 초 동안 300rpm 의 속도로 회전하는 롤러를 -

Table 1 Case study for optimum design

CASE	χ_1 (32.00~32.60mm)	χ_2 (37.16~37.76mm)
1	32.00mm	37.16mm
2	32.30mm	37.46mm
3	32.60mm	37.76mm

Table 2 Mean and variance of maximum stress

CASE	Mean (MPa)	Variance
1	0.542	0.00676
2	0.157	0.00799
3	0.106	0.00024

Table 3 Displacement of ball stud

CASE	Displacement (mm)
1	0.383
2	0.478
3	0.517

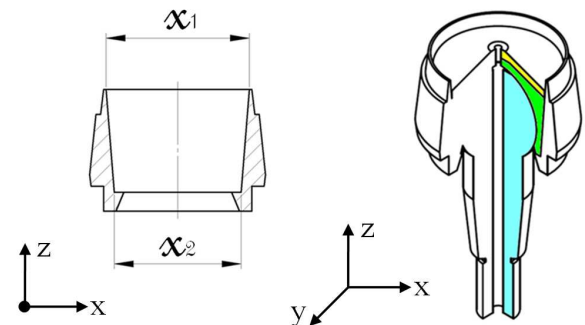


Fig. 7 Design variable

Z 방향 7.6mm 하강시켜 소켓을 소성변형하는 공정이다. 공정 여건에 따라 롤러의 운동 조건은 유동적이다. 볼 조인트의 유격시험해석은 볼 조인트에 실제 작용하중보다 과도한 하중을 $\pm Z$ 방향으로 작용시켜 베어링과 볼 스텐드 사이에 발생하는 유격량을 평가한다. 이상의 해석 절차를 정리하면 Fig. 5 와 같고 경계조건은 Fig. 6 과 같다. Fig. 6 에서 TJ 는 Translational joint 이며 Z 방향 자유도를 제외한 모든 방향의 구속을 의미한다. 그리고 CJ 는 Cylindrical joint 이며 Z 방향 및 Z 방향 회전 자유도를 제외한 모든 자유도의 구속을 의미한다. Fixed 는 모든 자유도의 구속을 의미한다.

3. 초기모델 및 제안모델 해석결과

본 연구에서는 우수한 모델을 결정하기 위하여 제안된 3 개의 모델을 가지고 구조 동역학 해석을 수행하였다. 이를 Table 1 에 표시하였다. 여기서

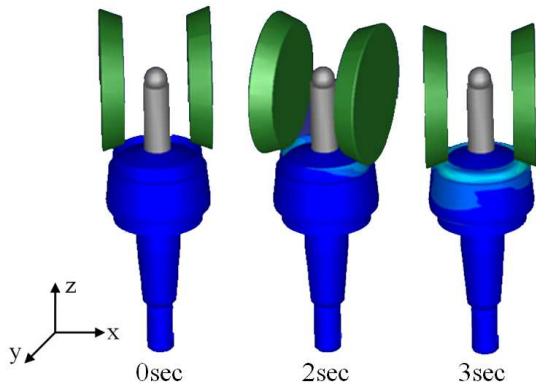


Fig. 8 von-Mises stress of ball joint for spinning analysis

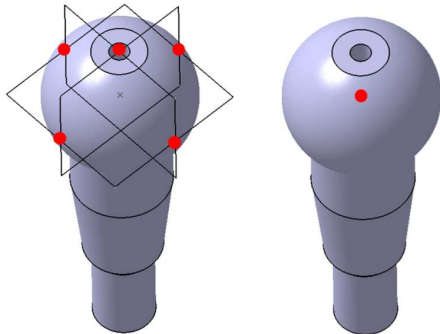


Fig. 9 Sample point of ball joint

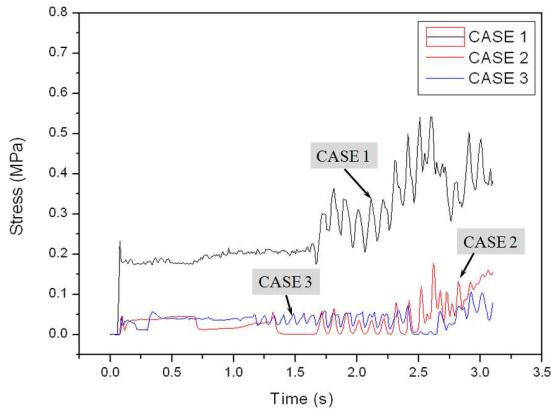


Fig. 10 Mean curve of von-Mises stress

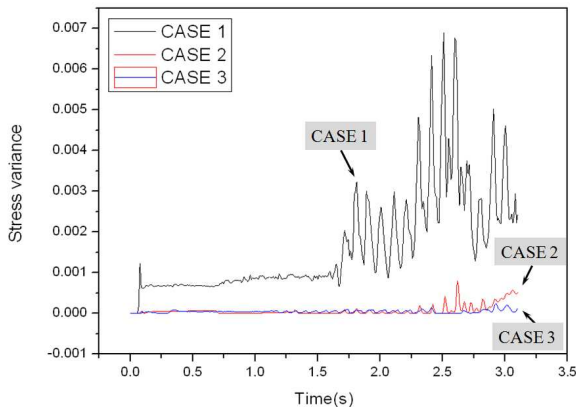


Fig. 11 Variance curve of von-Mises stress

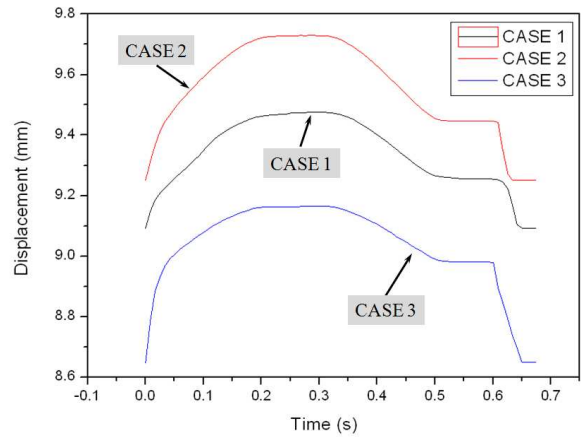


Fig. 12 Z-directional displacement of ball stud

CASE 2는 초기 설계이다. 볼 조인트의 설계시 주요한 변수는 소켓의 베어링 조립부 윗 지름(χ_1)과 아래 지름(χ_2)의 크기이며, 설계변수를 Fig. 7에 나타내었다.

볼 조인트의 구조 동역학 해석시 시간의 변화에 따른 형상 및 응력분포는 Fig. 8과 같다. 설계변수 변화에 따른 볼 조인트의 스피닝 해석 시 최대응력 값은 885.06MPa이며, 소성영역에서 큰 변화를 가지지 않으므로 주요한 인자가 되지 않는다. 플러깅 공정과 스피닝 공정시 볼 스테드의 볼에 작용하는 응력은 볼 조인트의 운동에 직접적인 영향을 주는 주요인자로 작용한다. 응력값이 클 경우 볼 조인트의 운동이 원활하지 않으며, 응력값이 작을 경우 유격이 커져 승차감 및 안전성에 문제를 초래한다. 볼 스테드 볼에 작용하는 응력의 값보다 중요한 인자는 볼 스테드에 작용하는 응력의 균일성이다. 볼 스테드에 작용하는 응력이 균일하지 않을 경우 스테드와 직접 마찰하는 베어링에 국부적인 마모 및 균열을 초래한다.

본 연구에서는 볼 스테드의 표면에 작용하는 응력값에 대한 평가보다는 볼 스테드 표면에 작용하는 응력의 균일성을 평가하였다. 응력의 균일성 평가 방법은 볼 스테드 표면 5개의 점으로 대표되는 응력값의 평균과 분산을 평가하였다. 볼 스테드에 발생하는 응력을 산출하기 위한 5개의 점을 Fig. 9에 표시하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 각 모델에 작용하는 응력 및 분산을 시간에 따른 값으로 나타내었다. 그리고 평균응력의 최대값과 분산을 Table 2에 나타내었다. Table 2의 결과에 의하면 초기 모델인 CASE 2번 모델의 값이 0.157MPa로서 3번 모델의 값 0.106MPa에 비해 약 67%정도 우수하다고 평가된다. 또한 볼 조인트의 유격시험

해석시 시간에 따른 각 모델의 변위를 Fig. 12 에 나타내었으며 최대 변위는 Table 3 에 나타내었다. Table 3 의 결과를 볼 때, 1 번 모델의 수직변위가 0.383mm 로 가장 작은 유격량을 나타낸다. 그러므로 1 번 모델의 값이 가장 우수하다고 평가할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 구조 동역학 프로그램을 이용하여 볼 조인트의 제작 공정에 관한 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서는 NX DAFUL 2.0 을 이용하여 구현이 어려웠던 코킹공정 및 유격시험에 관한 해석을 수행하였다.

(2) 가공 공정시 볼 스테르드에 발생하는 응력의 평균값과 분산을 반응치로 설정함으로써, 설계 후보 모델간의 상대 평가할 수 있다.

(3) 코킹 해석 후, 유격시험해석을 연속적으로 수행하여 실제 현상과 동일한 해석 절차를 적용함으로써 해석의 신뢰성을 제고하였다.

(4) 볼 조인트의 성능에 영향을 미치는 두개의 설계변수를 설정하고 케이스 스터디를 통해 최적의 모델을 제시하였다. 그러나 이를 극히 제한된 경우의 해석을 통해 선정된 해이다. 따라서 향후

과제로 보다 향상된 볼 조인트의 설계를 위하여 최적화 기법을 적용할 예정이다.

후 기

이 논문은 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Koh, S. K. and Hwang, H. Y., 2006, " Stress Analysis of Rubber Spring Seats for Automotive Steering Ball Joints using Finite Element Method," *Trans. of the KSAE*, Vol. 2, pp. 1172~1177.
- (2) Yoo, D. W. and Lee, J. H., 2009, "A Study on the Sliding Ball joint of Parallel Kinematic Mechanism," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 33, No. 9, pp. 982~989.
- (3) NX DAFUL 2.0, 2009, User's Manual, Ver 3.0, Virtual Motion.
- (4) Ryu, H. S., Jang, J. S., Choi, J. H. and Bea, D. S., 2004, "Track System Interactions Between the Track Link and Ground," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 28, No. 11, pp. 1711~1718.
- (5) Park, C. K., Lee, K. K., Lee, T. H. and Bea, D. S., 2003, "Optimization of a Train Suspension using Kriging Model," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 6, pp. 864~870.
- (6) HYPER MESH 10.0, 2010, User's Manual, Altair.