

## 자동차용 볼조인트의 구조적 성능 예측

김성욱<sup>1</sup>, 정경일<sup>1</sup>, 이권희<sup>1\*</sup>, 이동진<sup>2</sup>, 이명곤<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>동아대학교 기계공학과, <sup>2</sup>(주)센트랄

### Prediction of Structural Performance of an Automotive Ball Joint

Seong-Uk Kim<sup>1</sup>, Gyeong-II Jeong<sup>1</sup>, Kwon-Hee Lee<sup>1\*</sup>, Dong-Jin Lee<sup>2</sup>, Myeong-Gon Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Dong-A University

<sup>2</sup>Central

**요약** 자동차용 볼 조인트는 현가계와 조향계를 연결하는 부품으로 두 요소 사이에서 조향을 위해 회전 운동 및 직선 운동이 가능하도록 돕는 기계 부품이다. 본 연구의 대상은 중대형 픽업 트럭에 사용되는 볼 조인트이다. 각 단품으로는 스테드(Stud), 소켓(Socket), 시트(Bearing), 플러그(Plug)로 구성되어 있다. 볼 조인트의 주요 구조적 성능으로는 풀-아웃 강도 및 푸시-아웃 강도를 고려해야 한다. 이 구조적 성능들은 정해진 기준을 만족해야 하며 이를 만족시키지 못하면 보다 큰 사고를 유발할 수 있다. 볼 조인트의 설계 요구조건 만족 여부를 확인하기 위한 방법으로는 실험과 시뮬레이션 방법이 있으나 실험은 많은 시간과 비용이 소요된다. 본 연구에서는 볼조인트의 구조적 성능 예측을 위하여 모델링 소프트웨어로서 솔리드웍스(Solid Works)를, 유한요소해석 소프트웨어로서 아바쿠스(Abaqus)를 사용하였다. 유한요소해석은 2D 축대칭 모델의 정적 해석을 이용하여 요구되는 구조적 성능을 구하였다. 볼 조인트의 제작 시 발생하는 불확실한 요소를 제작 공차를 가정하였으며, 이에 따라 구조적 성능에 영향을 미치는 치수 설계 변수를 사례 연구를 수행해 파악하였다. 그리고 제작 공차를 수준 별로 정의 한 후, 사례연구를 이용해 구한 유한요소해석 결과값과 실험값을 비교하였다.

**Abstract** An automotive ball joint connects the suspension system to the steering system and helps to enable rotational and linear motion between the two elements for steering. This study examines a ball joint used in medium and large-sized pickup trucks. Ball joints consist of a stud, socket, bearing, and plug. The main structural performance metrics of ball joints are the pull-out strength and push-out strength. These structural parameters must meet certain criteria to avoid serious accidents. Test and simulation methods are used to investigate the design requirements, but tests are time-consuming and costly. In this study, we modeled ball joints in SolidWorks and performed a finite element analysis in Abaqus to predict structural performance. The analysis was used to obtain the structural performance required for the static analysis of a 2D axisymmetric model. The uncertainties in the manufacturing of the ball joint were assumed to be the manufacturing tolerances, and the dimensional design variables were identified through case studies. The manufacturing tolerances at each level were defined, and the results were compared with experimental results.

**Keywords :** Ball Joint, Robust Design, Uncertainty, Design Variable, Finite Element Method, Numerical Analysis

### 1. 서론

본 연구에서 사용된 볼 조인트는 중대형 픽업 트럭에 장착되며, 볼 조인트의 구성 부품으로는 일반적으로 스

터드(Stud), 소켓(Socket), 시트(Seat), 플러그(Plug)로 구성된다. 본 연구에 사용된 모델의 부품 중 소켓, 스테드, 플러그는SCM 재질, 시트는 Pom 재질이다. 소켓은 볼 조인트의 형상을 결정하고, 스테드는 회전 운동 및 직선

본 논문은 중소벤처기업부 지정 기업연계형 연구개발 인력양성사업의 다학제기반 고성능 자동차기계부품 설계인력양성 사업단(과제번호:N0001592)의 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Kwon-Hee Lee(Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-7638 email: leekh@dau.ac.kr

Received November 9, 2017

Revised December 13, 2017

Accepted January 5, 2018

Published January 31, 2018

운동을 가능하게 하는 역할을 한다. 그리고 플러그는 타 부품과 소켓간의 긴밀성을 유지하게 만든다. 시트의 경우 고무 재질로 제작되며, 베어링 역할을 하게 되어 스테드와 소켓간의 마찰을 줄여준다. 또한, 스테드와 시트 간 윤활 물질을 삽입하여 회전 운동과 직선 운동을 더욱 용이하게 한다. 본 연구의 볼 조인트 모델은 일반적인 모델과 달리 플러그와 소켓의 결합 위치가 하부가 아니라 상부에 위치하게 된다.

기존의 연구에서는 주로 볼 조인트의 코킹 공정에 관한 예측 및 구조적 성능의 해석에 중점을 두고 연구하였다[1-2]. 코킹 공정(Cauking Process)이란 볼 조인트의 부품들을 코킹 머신을 이용하여 조립하는 공정이다. 코킹 공정을 다풀(DAFUL) 소프트웨어를 이용하여 코킹 공정 시 발생하는 소켓부의 잔류응력을 예측하였으며, 이를 볼 조인트의 구조적 성능 중 하나인 풀-아웃(Pull-out Strength) 강도를 계산하는데 적용하는 방법을 제시하였다. 그리고 수치 해석의 신뢰도를 높이기 위해, 볼 조인트의 제작 시 발생하는 불확실성들(제작 공차 및 재료의 물성치)을 고려한 파라미터설계(Parameter Design) 방법을 제시하였다[3-5]. 그러나 기존의 연구에 적용된 불확실성의 수치는 단순히 임의로 정의하는 값이었다. 볼 조인트의 구조적 성능의 예측 및 설계 시, 불확실성의 수치를 정확한 값으로 적용해야 신뢰도가 높은 결과를 도출한다.

본 연구에서는 볼 조인트의 구조적 성능을 실험과 아바쿠스(Abaqus) 소프트웨어를 사용하여 구하였다. 그리고 수치 해석을 이용한 사례 연구를 수행해 구조적 성능에 영향을 미치는 설계 변수를 찾은 후, 설계 변수에 불확실성을 적용하여, 다시 볼 조인트의 구조적 성능을 예측하는 사례 연구를 수행하였다. 사례 연구로 얻은 구조적 성능의 예측값을 실험값과 비교하여 도출된 설계 변수 및 불확실성의 값은 향후 볼 조인트의 설계 시 적용되어, 지금까지의 볼 조인트 설계보다 더 신뢰성있는 설계를 제공할 것이다.

## 2. 볼 조인트의 구조적 성능

### 2.1 풀-아웃 강도 및 푸시-아웃 강도

본 연구에서는 볼 조인트의 구조적 성능으로 풀-아웃 강도와 푸시-아웃 강도(Push-out Strength)를 고려하였다. 풀-아웃 강도는 볼 조인트의 스테드가 빠지는 강도로

소켓을 고정시킨 후, 스테드를 수직방향 위로 잡아당기는 방식으로 측정된다. 또한, 푸시-아웃 강도는 볼 조인트의 소켓을 고정시킨 후, 스테드를 수직방향 아래로 잡아당기는 방식으로 측정된다. 만일 수많은 볼 조인트 제품 중 하나라도 구조적 성능인 풀-아웃 강도 및 푸시-아웃 강도의 기준치에 못 미치게 되면, 조향계 부품과 현가계 부품간의 결합이 분해되어 큰 사고를 초래한다.

### 2.2 볼 조인트의 불확실성

실험 시 발생하는 불확실성이란 동일한 실험을 같은 조건 하에 진행하지만 실험의 결과값이 매번 다르게 얻어지는 것이다. 이러한 이유로는 실험 환경, 재료의 물성치, 제작 공차 등이 있다. 불확실성으로 인해 제품 제작 시, 볼 조인트 각각의 구조적 성능은 영향을 받게 되어 일정한 구조적 성능을 가지지 못하게 된다. 대표적인 불확실성으로 제작 공차가 있다. 본 연구에서는 구조적 성능에 영향을 미치는 치수 설계 변수를 찾은 후, 불확실성에 영향을 미치는 인자를 제작 공차로 가정하여 수준(Level) 별로 설정하였다. 그리고 설정한 수준 별 제작 공차를 치수 설계 변수에 적용한 후, 사례 연구를 수행해 평균값 및 표준 편차를 구하였으며, 이를 실험값의 표준 편차와 비교하여 구조적 성능과 제작 공차간의 상관 관계를 밝히는 것에 중점을 두었다.

## 3. 볼 조인트의 강도 해석

### 3.1 볼 조인트의 풀-아웃 강도 해석

본 연구에서 사용된 모델의 3D 모델의 형상 및 단면 형상은 Fig.1과 같으며, Abaqus 소프트웨어를 사용하여 2D 축대칭 정적 해석으로 수행하였다. 풀-아웃 해석의 경계 조건 및 하중 조건으로는 소켓의 하단 부의 선(Fig.2, 붉은 선), 가장 우측의 선(Fig.2, 붉은 선)을 모두 고정된 후, 스테드의 가장 윗 부분의 선(Fig.2, 검정 선)을 수직 방향 위로 잡아당기게 된다. 스테드에 수직 방향으로 +20mm의 변위를 가하게 되며, 풀-아웃 강도는 변위를 준 절점들에서 최대 반력의 합으로 계산된다. 그리고 풀-아웃 강도 해석 시, 풀-아웃 강도에 영향을 미치지 않는 Pom 재질인 시트부의 일정 부분을 제거하여, 대변형으로 인한 해석 오류를 방지하였다. 풀-아웃 강도의 수치 해석 예측값은 70.12kN으로 계산되었다.

Table 1. Pull-out strength by Experiments

no.	Pull-out Strength(kN)
1.	72.21
2.	72.93
3.	70.29
4.	72.73
5.	73.33
6.	70.26

[ $\mu$ (Average):71.96kN,  $\sigma$ (Standard Deviation):1.35kN]

Table 2. Push-out strength by Experiments

no.	Push-out Strength(kN)
1.	121.95
2.	123.50
3.	124.22
4.	124.16
5.	123.66
6.	122.63

[ $\mu$ (Average):123.35kN,  $\sigma$ (Standard Deviation):0.90kN]

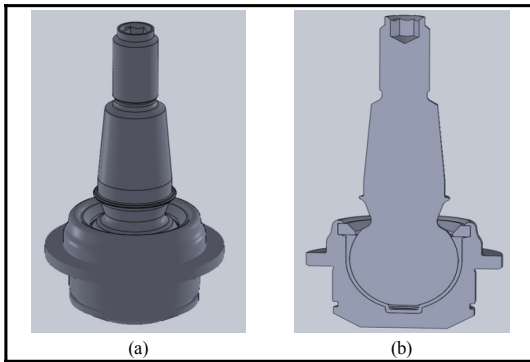


Fig. 1. (a) 3D Model (b) Sectional Shape

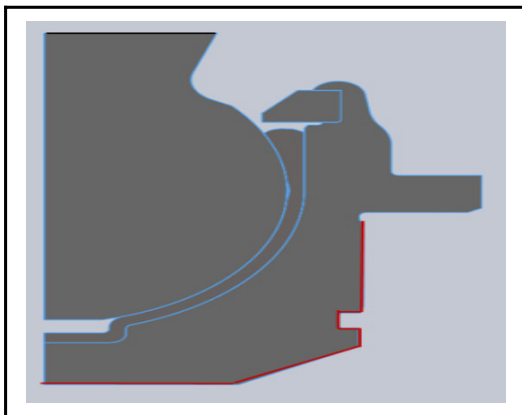


Fig. 2. Boundary and Force Condition in Abaqus

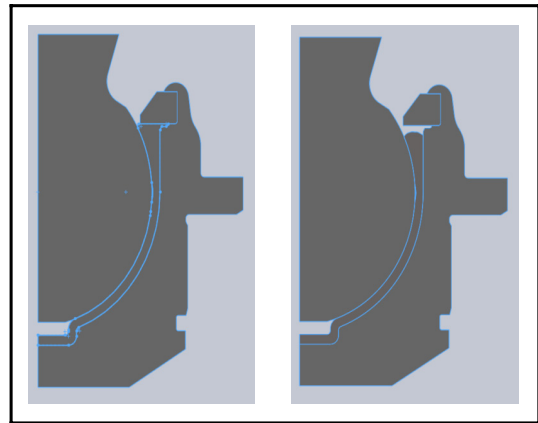


Fig. 3. (a) Initial Axisymmetric Section Model  
(b) Modified Axisymmetric Section Model

풀-아웃 강도의 실험(Table 1.)은 총 6번 진행하였고, 평균값은 71.96kN, 표준 편차는 1.35kN으로 계산되었다.

예측값과 실험값은 1.84kN의 차이와 2.56%의 오차를 보였다. 본 모델의 풀-아웃 강도의 요구 성능은 45kN으로 실험값과 예측값 모두 요구 성능 이상이었다.

### 3.2 볼 조인트의 푸시-아웃 강도 해석

푸시-아웃 강도 해석은 풀-아웃 강도 해석과 같은 방식(2D 축대칭 정적 해석)으로 수행하였다. 그리고 경계 조건은 풀-아웃 강도 해석과 동일하게 소켓의 하단 부, 가장 우측의 선을 모두 고정하게 되며(Fig.1, 붉은 선), 하중 조건으로는 스티드의 가장 윗 부분의 선(Fig.2, 검정 선)에 수직 방향 아래로 -20mm의 변위를 가하게 된다(풀-아웃 강도 해석의 변위양은 동일하지만, 방향을 반대로 가함). 푸시-아웃 강도의 정의도 풀-아웃 강도와 마찬가지로, 변위를 준 절점들에서 최대 반력의 합으로 계산된다. 푸시-아웃 강도의 수치 해석 예측값은 152.7 kN으로 계산되었다.

푸시-아웃 강도 실험(Table 2.)은 총 6번 진행하였고, 평균값은 123.35kN, 표준 편차는 0.9kN으로 계산되었다.

본 연구에서 사용된 모델의 경우, 플러그가 수직 아래 방향으로 빠질 수 없는 구조이기 때문에 일정 시간이 지난 후, 실험과 수치 해석이 종료된다. 본 모델의 푸시-아웃 강도의 요구 성능으로는 60 kN으로, 실험값과 예측값 모두 요구 성능 이상이었다.

## 4. 제작 공차를 고려한 강건설계 사례 연구

### 4.1 구조적 성능에 영향을 미치는 설계 변수

본 연구에 사용된 볼 조인트의 풀-아웃 강도는 실험 및 수치 해석을 통해 요구 성능보다 훨씬 큰 값을 가지는 것을 알 수 있었으므로, 풀-아웃 강도에 중점을 두고 연구하였다. 풀-아웃 강도 실험은 총 6번 진행하였고, 평균값을 계산한 결과는 71.96 kN, 표준 편차는 1.35 kN 이 도출되었다. 실험의 결과값에 영향을 미치는 것들은 재료의 물성치, 실험 환경, 제작 공차 등 여러 인자가 있다. 본 연구에서는 볼 조인트 구조적 성능에 영향을 미치는 불확실성 인자를 치수 제작 공차로 가정하였고, 치수 제작 공차를 적용할 치수 설계 변수를 찾기 위해 총 6가지 경우의 사례 연구를 진행하였다. 사례 1. ~ 사례 6. 의 설계 변수는 Fig.4 ~ Fig.9에 나타냈고, 설계 변수의 증감에 따른 풀-아웃 강도 값의 변화를 사례 별로 Table 3. ~ Table 8.에 나타냈다.

사례 1.의 치수 설계 변수는 소켓의 가장 아래 부분의 선을 고정된 후, 소켓과 플러그의 결합 부분까지의 길이로 선정하였다. 그리고 길이가 증가하는 방향을 +방향, 길이가 감소하는 방향을 -방향으로 정의하였다. 설계 변수를 +방향으로 최대 5mm, -방향으로는 플러그와 스테드 부품간의 간섭을 피할 수 있는 최대값인 1mm만큼 변화를 주어 해석을 수행하였다. 이는 풀-아웃 강도 해석 시, 스테드와 플러그의 접촉부를 수직방향 아래, 위로 변화시킨 것을 의미하며, 이에 따른 풀-아웃 강도 값은 거의 일정하였다.

사례 2.의 경우 스테드의 수직선을 고정시킨 후, 시트부와 결합하는 부분까지의 반경을 설계 변수로 선정하였다. 그리고 길이가 증가하는 방향을 +방향, 길이가 감소하는 방향을 -방향으로 정의하였다. 기존 모델로부터 설계 변수를 최대 +5mm, 최소 -3mm만큼 증감시켜 해석을 수행하였다. 스테드의 최대 반경이 풀-아웃 강도에 미치는 영향을 파악하기 위한 것으로, 설계 변수의 증감에 따른 풀-아웃 강도 값의 변동을 확인 할 수 있었다. 그 이유는 스테드가 플러그와 접촉할 때 접촉 면적이 변하기 때문으로 파악되었다.

사례 3.은 스테드의 수직선을 고정시키고, 소켓의 가장 우측선, 표시된 직선(Fig.6, 붉은색 타원형 부분)까지의 길이를 설계 변수로 선정하였다. 그리고 설계 변수의

길이 증감 시, 소켓을 제외한 나머지 부품의 형상은 변하지 않게 하였고, 설계 변수의 길이가 증가하는 방향을 +방향, 길이가 감소하는 방향을 -방향으로 정의하였다. 설계 변수를 최대 +5mm, 최소 -2mm만큼 증감시켜 해석을 수행하였으며, 이는 소켓의 아랫 부분의 반경이 풀-아웃 강도에 미치는 영향을 파악하기 위한 것이었다. 수치 해석의 예측값을 살펴보면 소켓의 반경이 변화하여도 풀-아웃 강도 값에 미치는 영향이 작음을 확인하였다.

사례 4.의 설계 변수는 스테드의 수직선을 고정된 후 소켓의 가장 우측면, 윗 부분의 선(Fig.6. 붉은색 타원형 부분)까지의 길이로 선정하였다. 사례 3.처럼 설계 변수의 길이 증감 시 소켓을 제외한 나머지 부품의 형상은 변하지 않게 하였으며, 방향은 사례 3.와 같게 설정하였다. 그리고 설계 변수를 최대 +5mm, 최소 -1mm만큼 증감시켜 해석을 수행하였으며, 이는 소켓의 윗 부분의 반경이 풀-아웃 강도에 미치는 영향을 파악하기 위한 것이었다. 그 결과 소켓 윗 부분의 반경이 증감하여도 풀-아웃 강도 값에 미치는 영향은 미미하였다.

사례 5.의 경우 붉은색의 선중에서 수직선을 고정하고, 다른 붉은색의 선과의 각도를 설계 변수로 선정하였다. 그리고 각도가 감소하는 방향을 -방향, 각도가 증가하는 방향을 +방향으로 정의하였다. 기존 모델로부터 설계 변수를 최대 +20°, 최소 -40°만큼 증감시켜 해석을 수행하였으며, 이번 사례 연구는 플러그의 형상 변화가 풀-아웃 강도에 영향을 미치는지를 파악하기 위한 것이었다. 해석 결과를 보면, 설계 변수가 증감에 따라 풀-아웃 강도 값이 변화하였다. 이는 스테드와 플러그의 접촉 시, 플러그의 형상이 바뀌기 때문에 스테드의 변위를 억제하는 힘이 달라져 예측값이 변화한 것으로 보였다.

사례 6.은 플러그의 아랫면을 고정된 후 화살표 부분의 플러그 길이(플러그의 가장 왼쪽 수직선)를 설계 변수로 선정하였다. 그리고 길이가 증가하는 방향을 +방향, 길이가 감소하는 방향을 -방향으로 정의하였다. 설계 변수를 최대 +1.81mm, 최소 -0.69mm만큼 증감시켜 해석을 수행하였으며, 이번 사례 연구를 진행한 목적은 사례 5.와 동일하다. 사례 5.와 같은 사유로 설계 변수의 증감에 따라 풀-아웃 강도 예측값의 변동을 확인하였다.

결과적으로, 사례 2, 사례 5, 사례 6의 경우, 치수 설계 변수가 풀-아웃 강도에 영향을 미친다고 판단되었다. 그러나 사례 5.의 설계 변수는 붉은색 선 중에서 수직선

을 기준선으로 고정한 후, 각도를 +방향으로 변화시키는 것과 사례 6.의 설계 변수를 +방향으로 길이를 변화시키는 것과 유사하였다. 또한, 사례 5.의 설계 변수를 -방향으로 각도를 변화시키는 것도 사례 6.의 설계 변수를 -방향으로 변화시키는 것과 동일하였다. 이런 사유로 사례 5.의 설계 변수를 다음 단계에서 고려하지 않기로 하였으며, 사례 2.와 사례 6.의 설계 변수를 볼 조인트의 구조적 성능에 영향을 미치는 치수 설계 변수로 선정하였다.

#### 4.2 제작 공차를 적용한 강건설계 사례 연구

풀-아웃 실험에 의하여 도출된 평균값은 71.96 kN, 표준 편차는 1.35 kN이었다. 그리고 수치 해석을 이용해 평균값 및 표준 편차를 구하기 위해, 설계 변수에 임의의 크기의 제작 공차를 부여한 후, 강건 설계 기법을 적용한 사례 연구를 수행하였다.

풀-아웃 강도 실험 시, 발생하는 표준 편차를 4.1에서 찾은 설계 변수의 제작 공차로 인한 것이라 가정하여 사례 연구를 수행하였다. 변수의 개수는 2개이며, 사례 1.의 치수 설계 변수를  $x_1$ , 사례 2.의 치수 설계 변수를  $x_2$ 라 정의하였다. 각 변수에 적용할 제작 공차의 크기를 가정하여, ± 제작 공차를 적용한 설계 변수의 치수 & 초기 설계 변수의 치수, 이렇게 총 3가지의 경우를 수준 1, 수준 2, 수준 3으로 설정하였다. 그리고 설계 변수에 3가지 경우의 제작공차를 모두 반영할 수 있는 전조합(Full Combination) 해석을 실시하였다.

치수 설계 변수 및 초기 길이는 Figure.10에 표기되어 있으며, 수치 해석을 이용해 평균값 및 표준 편차를 도출하기 위해 총 4번의 전조합 해석사례 연구를 실시하였다. 각 수준 별 치수는 Table 9. ~ Table 12.에 나타내었다.

각 수준 별 제작 공차의 치수를 살펴보면, 사례 1-1.(Table 9.)은  $x_1, x_2$  모두 제작 공차를 ±1mm로 설정하였고, 사례 2-1.(Table 10.)에서의 제작 공차로는  $x_1$ 은 ±1mm,  $x_2$ 은 ±0.3mm으로 설정하였다. 사례 3-1.(Table 11.)의 경우에는  $x_1, x_2$ 의 제작 공차를 모두 ±0.3mm로 설정하였으며, 사례 4-1.(Table 12.)에서는  $x_1$ 은 ±0.5mm,  $x_2$ 는 ±0.2mm로 공차를 설정하여 해석을 수행하였다. 각 사례 별로 전조합 해석을 수행한 결과는 Table 11. ~ Table 14.에 나타내었다.

사례 1-1.의 결과(Table 13.)에서 no. 3의 풀-아웃 강도의 예측값이 실험 데이터와 차이가 많이 나는 것을 확

인하였고, 표준 편차가 이미 크게 발생했으므로 더 이상의 해석 진행은 무의미하다고 판단되어 해석을 중단하였다. 사례 2-1.의 결과(Table 14.)에서 도출된 평균값은 69.5kN으로, 실험값과 약 3.68%의 오차를 확인하였고, 풀-아웃 강도의 표준 편차는 1.97kN으로 약 46.67%의 오차를 나타냈다. 사례 3-1.의 결과(Table 15.)로 구해진 풀-아웃 강도의 평균값 및 표준 편차의 값은 각각 69.52kN, 0.92kN이며, 오차는 각각 약 3.39%, 약 31.85%이다. 사례 4-1.의 결과(Table 16.)에서 도출된 풀-아웃 강도의 표준 편차는 실험값과 가장 유사한 1.40kN이었고, 평균값은 69.52kN이었다. 각각의 오차는 약 3.70%, 약 3.39%이었다.

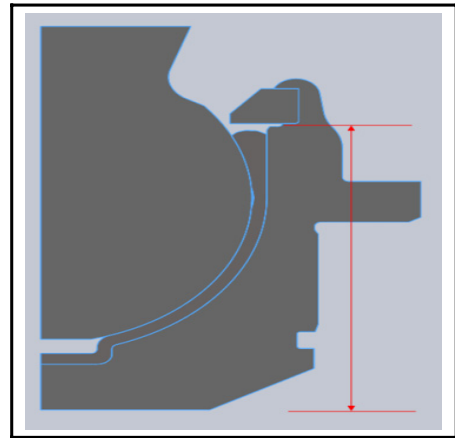


Fig. 4. Size variables of Case 1.

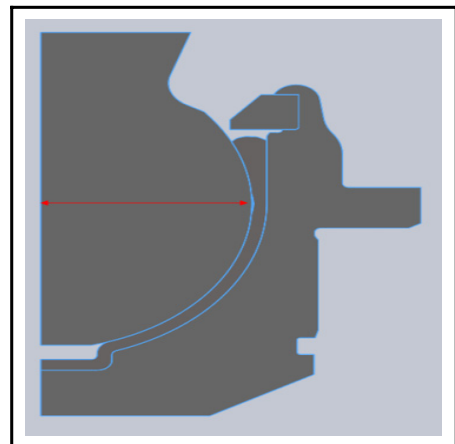


Fig. 5. Size variables of Case 2.

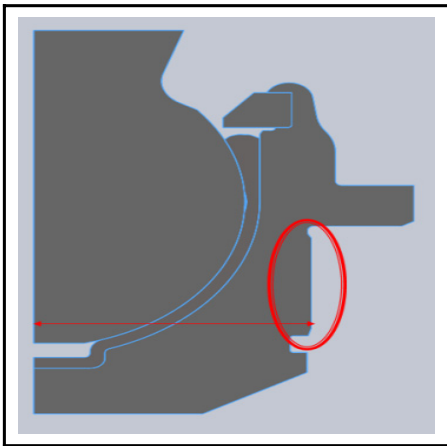


Fig. 6. Size variables of Case 3.

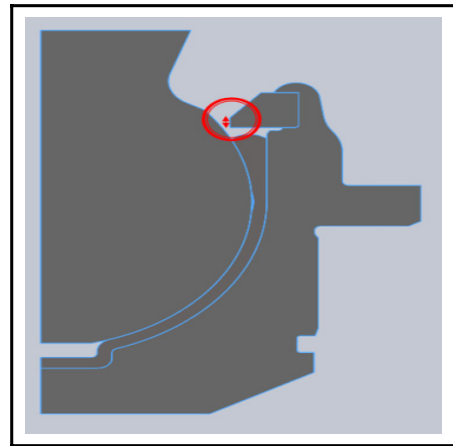


Fig. 9. Size variables of Case 6.

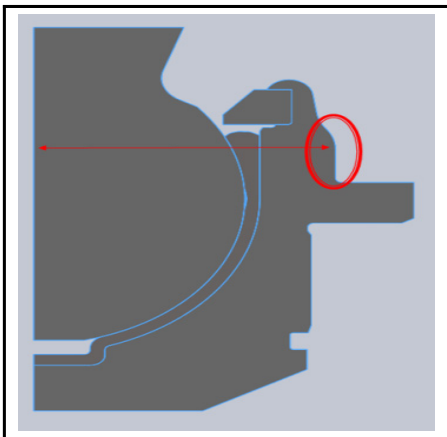


Fig. 7. Size variables of Case 4.

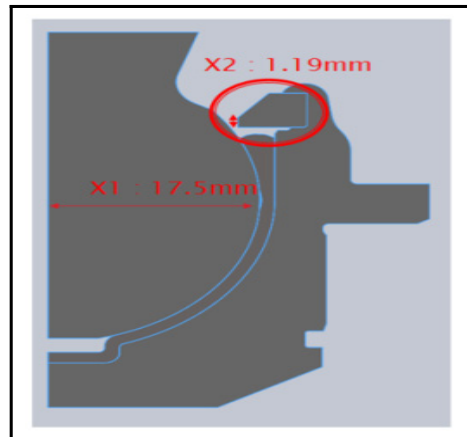


Fig. 10. Size design variables of Original Model

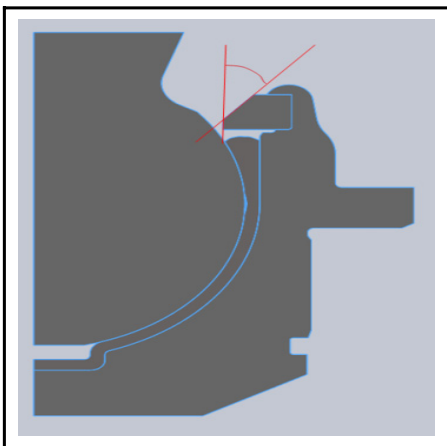


Fig. 8. Size variables of Case 5.

Table 3. Pull-out strength according to variation of size variable in Case 1.

Variation	Length (mm)	Pull-out Strength(kN)
+5	39.45	70.7
+3	37.45	70.7
original model	34.45	70.12
-1	33.45	71.8

Table 4. Pull-out strength according to variation of size variable in Case 2.

Variation	Length (mm)	Pull-out Strength(kN)
+5	22.5	76.87
+3	20.5	74.79
original model	17.5	70.12
-3	14.5	64.68

Table 5. Pull-out strength according to variation of size variable in Case 3.

Variation	Length (mm)	Pull-out Strength(kN)
+5	28	70.5
original model	23	70.12
-2	21	69.85

Table 6. Pull-out strength according to variation of size variable in Case 4.

Variation	Length (mm)	Pull-out Strength(kN)
+5	30	70.86
original model	25	70.12
-1	24	69.76

Table 7. Pull-out strength according to variation of degree variable in Case 5.

Variation	Degree (°)	Pull-out Strength(kN)
+20	60	57.8
original model	40	70.12
-40	0	78

Table 8. Pull-out strength according to variation of size variable in Case 6.

Variation	Length (mm)	Pull-out Strength(kN)
+1.81	3	75.92
original model	1.19	70.12
-0.69	0.5	63.76

Table 9. Size for each level of Case 1-1.

Level	$x_1$ (mm)	$x_2$ (mm)
Level 1	18.5	2.19
Level 2	17.5	1.19
Level 3	16.5	0.19

[  $x_1$  :±1mm,  $x_2$  :±1mm ]

Table 10. Size for each level of Case 2-1.

Level	$x_1$ (mm)	$x_2$ (mm)
Level 1	18.5	1.49
Level 2	17.5	1.19
Level 3	16.5	0.89

[  $x_1$  :±1mm,  $x_2$  :±0.3mm ]

Table 11. Size for each level of Case 3-1.

Level	$x_1$ (mm)	$x_2$ (mm)
Level 1	17.8	1.49
Level 2	17.5	1.19
Level 3	17.2	0.89

[  $x_1$  :±0.3mm,  $x_2$  :±0.3mm ]

Table 12. Size for each level of Case 4-1.

Level	$x_1$ (mm)	$x_2$ (mm)
Level 1	18	1.39
Level 2	17.5	1.19
Level 3	17	0.99

[  $x_1$  :±0.5mm,  $x_2$  :±0.2mm ]

Table 13. Full combination analysis of Case 1-1.

no.	$x_1$ (mm)	$x_2$ (mm)	Pull-out Strength (kN)
1.	18.5	2.29	73.58
2.	18.5	1.19	72.49
3.	18.5	0.19	62.44
4.	17.5	2.29	
5.	17.5	1.19	
6.	17.5	0.19	
7.	16.5	2.29	
8.	16.5	1.19	
9.	16.5	0.19	

[  $\mu$ (Average):69.5kN,  $\sigma$ (Standard Deviation):6.14kN ]

Table 14. Full combination analysis of Case 2-1.

no.	$x_1$ (mm)	$x_2$ (mm)	Pull-out Strength (kN)
1.	18.5	1.49	71.048
2.	18.5	1.19	72.485
3.	18.5	0.89	70.885
4.	17.5	1.49	68.379
5.	17.5	1.19	70.12
6.	17.5	0.89	68.2
7.	16.5	1.49	67.21
8.	16.5	1.19	69.03
9.	16.5	0.89	66.39

[  $\mu$ (Average):69.3kN,  $\sigma$ (Standard Deviation):1.97kN ]

Table 15. Full combination analysis of Case 3-1.

no.	$x_1$ (mm)	$x_2$ (mm)	Pull-out Strength (kN)
1.	17.8	1.49	70.148
2.	17.8	1.19	70.942
3.	17.8	0.89	69.156
4.	17.5	1.49	69.612
5.	17.5	1.19	70.12
6.	17.5	0.89	68.71
7.	17.2	1.49	69.047
8.	17.2	1.19	70.1
9.	17.2	0.89	67.88

[  $\mu$ (Average):69.52kN,  $\sigma$ (Standard Deviation):0.92kN]

Table 16. Full combination analysis of Case 4-1.

no.	$x_1$ (mm)	$x_2$ (mm)	Pull-out Strength (kN)
1.	18	1.39	69.326
2.	18	1.19	71.084
3.	18	0.99	71.387
4.	17.5	1.39	68.204
5.	17.5	1.19	70.117
6.	17.5	0.99	69.927
7.	17	1.39	66.824
8.	17	1.19	69.755
9.	17	0.99	69.07

[  $\mu$ (Average):69.52kN,  $\sigma$ (Standard Deviation):1.40N]

### 5. 결론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 Abaqus 소프트웨어를 이용해 자동차용 볼 조인트의 구조적 요구 성능인 풀-아웃 강도 및 푸시-아웃 강도를 예측하였으며, 이를 실험값과 비교하였다. 풀-아웃 강도의 실험값과 수치 해석의 예측값은 유사하였으며 오차율은 약 2.56%로 확인하였다.
2. 본 논문의 본문에서는 볼 조인트의 구조적 성능인 풀-아웃 강도 실험 시 발생하는 불확실성을 볼 조인트 제작 시 발생하는 제작 공차로 가정하였다. 그리고 제작 공차를 적용할 풀-아웃 강도에 영향을 미치는 치수 설계 변수를 찾기 위해 사례 연구를 진행하였다. 사례 연구 결과, 총 2개의 치수 설계 변수가 풀-아웃 강도 값에 영향을 크게 미치는 것으로 파악되었다.

3. 풀-아웃 강도에 영향을 미치는 2개의 치수 설계 변수에 제작 공차를 총 3개의 수준으로 설정하여 적용하였다. 그리고 수치 해석을 이용해 풀-아웃 강도 값의 평균값 및 표준 편차를 얻기 위해, 강건 설계 기법을 적용한 전조합 해석의 사례 연구를 총 4번 수행하였다. 풀-아웃 강도 실험의 평균값 및 표준 편차와 가장 유사한 값을 도출했던 경우는 사례 4-1.이었다. 치수 설계 변수의 제작 공차 값은  $x_1, x_2$ 가 각각  $\pm 0.5\text{mm}$ ,  $\pm 0.2\text{mm}$ 이며, 실험에서 얻은 풀-아웃 강도의 평균값 및 표준 편차와의 오차율은 3.39%, 3.7%로 본 논문에서 구한 제작 공차가 실제 볼 조인트 제작 시 발생하는 제작 공차와 유사하였다.
4. 본 연구에서 밝혀낸 볼 조인트의 구조적 성능에 영향을 미치는 치수 설계 변수와 불확실성 인자 중 하나인 제작 공차의 값을 향후 볼 조인트의 최적 설계 시 적용하여 신뢰성있는 설계를 할 수 있을 것으로 예상된다.

### References

- [1] Jang, B. H and Lee, K. H., "Analysis and design of a ball Joint, considering manufacturing process," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 228, no. 1, pp. 146-151, 2014.
- [2] Sin, B.S. and Lee, K.H., "Process Design of a Ball Joint, Considering Caulking and Pull-Out Strength," The Scientific World Journal, vol. 2014, ID 971679, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/971679>
- [3] Sin, B. S., "Optimum Design of a Ball Joint for Vehicle," A Thesis for a Master, Dong-A University, Republic of Korea, 2014.
- [4] Phadke, M.S., Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1989.
- [5] Lee, K. H., "A Robust Structural Design Method Using the Kriging Model to Define the Probability of Design Success," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 224, no. 2, pp. 379-388, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1736>
- [6] Montgomery, D.C, 1991, Design and Analysis of Experiments, 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley&Sons, Singapore, 1991.
- [7] K.H. Lee, "A robust structural design method using the kriging model to define the probability of design success," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 224, no. 2, pp. 379-388, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1736>
- [8] B.S. Sin, "Robust Design of an Automobile Ball Joint Considering the Worst-Case Analysis," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers,



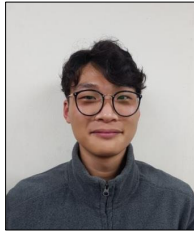
vol. 16, no. 1, pp.102-111, 2017.

DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2016.16.1.102>

[9] G.Taguchi, *Systems of Experimental Design*(vol. I,II), Kraus International Publications, New York, USA, 1987.

**김 성 욱(Seong-Uk Kim)**

[준회원]



- 2016년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>  
기계설계, 최적설계

**정 경 일(Gyeong-Il Jeong)**

[준회원]



- 2012년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 학부과정

<관심분야>  
기계설계, 최적설계

**이 권 희(Kwon-Hee Lee)**

[정회원]



- 1991년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계설계학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 한양대학교 공과대학 기계설계학과 (공학박사)
- 1994년 6월 ~ 1999년 6월 : 대우 자동차 선임연구원
- 2002년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 기계공학과 교수

<관심분야>  
기계설계, 최적설계

**이 동 진(Dong-Jin Lee)**

[정회원]



- 1983년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학학사)
- 1983년 3월 ~ 2005년 7월 : (주) 카스코 책임연구원
- 2005년 8월 ~ 2007년 6월 : 현대모비스 책임연구원
- 2007년 6월 ~ 현재 : (주) 센트랄 상무

<관심분야>  
기계설계, 시험

**이 명 곤(Myeong-Gon Lee)**

[정회원]



- 2014년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학학사)
- 2016년 2월 : 동아대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 센트랄 CAE 팀 사원

<관심분야>  
자동차 구조/피로, 플라스틱 사출품