

유니버설조인트의 강도 및 피로 해석

조재웅*, 한문식⁺

(논문접수일 2011. 03. 09, 심사완료일 2011. 05. 26)

Strength and Fatigue Analysis of Universal Joint

Jae-Ung Cho*, Moon-Sik Han⁺

Abstract

Chassis part in automotive body is affected by fatigue load at driving on the ground. Universal joint on this part is influenced extremely by the fatigue load. Fatigue life, damage and natural frequency are analyzed at universal joint under nonuniform fatigue load. The yolk part at universal joint is shown with the maximum equivalent stress and displacement of 60.755 MPa and 0.21086 mm as strength analysis. The possible life in use in case of 'SAE bracket' is the shortest among the fatigue loading lives of 'SAE bracket', 'SAE transmission' and 'Sine Wave'. The damage at loading life of 'SAE transmission' is the least among 3 types. The frequency of damage in case of 'Sine Wave' is 0.7 with the least among 3 fatigue loading life types but this case brings the most possible damage as 80% at the average stress of 0. Natural vibration at this model is analyzed with the orders of 1st to 5th and maximum frequency is shown as 701.73 Hz at 5th order. As the result of this study is applied by the universal joint on chassis part, the prevention on fatigue damage in automotive body and its durability are predicted.

Key Words : Universal joint(유니버설조인트), Fatigue life(피로수명), Fatigue damage(피로 손상), Damage frequency(손상 빈도수), Natural frequency(고유진동수), Durability(내구성)

1. 서론

유니버설 조인트는 두 축이 비교적 떨어진 위치에 있는 경우 나 두 축의 각도(편각)가 큰 경우에 이 두 축을 연결하기 위하여 사용되는 축이음(커플링)의 일종이다. 자동차의 프로펠러 샤프트나 드라이브샤프트 등의 연결부 및 자동차의 스티어링 기구 등에 쓰인다. 주동축이 등속회전운동을 하고 있을 경우, 주동축의 요크에 연결된 십자베어링을 통해 동력 전달축의 요크로 전달되고 반대쪽의 종동축까지 연결 된다.

또한 유니버설 조인트는 혹 조인트라고도 불리며 이 커플링의 이음에는 유니버설 핀 조인트와 유니버설 볼 조인트 등이 있다. 유니버설 조인트의 장점으로는 비교적 큰 동력을 전달할 수 있고 구동축에 대한 각도의 변화에도 동력을 전달할 수 있다. 또한 신축자재이음을 병행함으로써

축간거리 변화에도 대응할 수 있다. 단점으로는 연결부의 마모로 인하여 회전중심의 변화가 일어 날 수 있고 먼 거리 전달 시 많은 부품이 소요됨으로 중량이 많이 나간다. 또한 주유주기가 짧고 회전각속도가 다르기 때문에 필히 2개를 한 조로

* 공주대학교 기계자동차공학부

⁺ 교신저자, 계명대학교 기계자동차공학과 (sheffhan@kmu.ac.kr)

주소: 704-701 대구시 달서구 달구벌대로 2800

사용하여야 한다. 또한 자동차 운행 중 바퀴 회전 시 새시 부분에 있어서의 등속 조인트에서 강도 및 피로 하중의 영향을 많이 받는다. 따라서 본 연구에서는 자동차바퀴 회전 시 등속 조인트의 강도 및 피로 해석을 수행하여 보았다⁽¹⁾. 본 연구의 결과를 종합하여 유니버설 조인트에 응용한다면 그 파손 방지 및 내구성을 검토, 예측하는데 활용이 클 것으로 사료된다.

2. 모델 및 구속 조건

2.1 연구 모델

본 연구에서는 유니버설 조인트가 일정한 힘을 받았을 때 일어나는 변형과 응력에 관한 해석을 하였다. 본 연구에서의 등속 조인트모델은 Fig. 1과 같이 길이가 736mm, 폭이 93mm, 높이가 90mm이며, CATIA를 이용하여 각각의 부품을 파트로 설계하고 어셈블리로 조립하였다. 본 연구 모델의 유한요소는 Fig. 2와 같이 구성하였으며, Mesh의 절점수는 13812개이며, 요소는 7208개로 구성하였다. 물성치는 구조용 강으로서 Table 1과 같다.

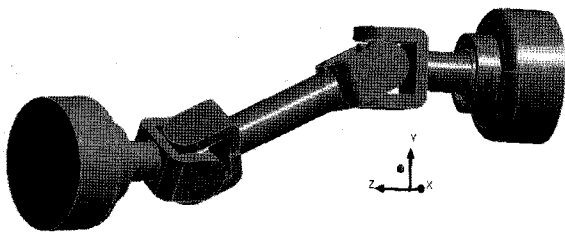


Fig. 1 Configuration of model

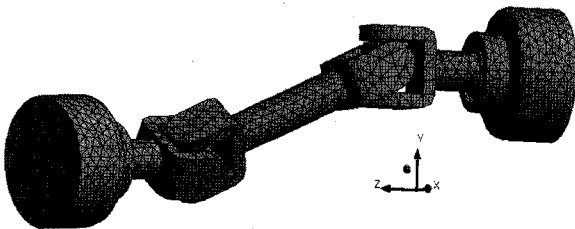


Fig. 2. Model of mesh

Table 1 Material property

Young's Modulus	200000MPa
Poisson's Ratio	0.3
Density	0.00000785Kg/mm ³
Tensile Yield Strength	250MPa
Compressive Yield Strength	250MPa
Tensile Ultimate Strength	460MPa
Compressive Ultimate Strength	0MPa

2.2 구조 해석 구속 조건

유니버설 조인트의 재료는 구조용 강으로 되어 있으며 해석을 위한 유니버설 조인트를 위한 구속 조건으로 Fig. 3과 같이 Fixed Support를 유니버설 조인트 오른쪽 측 옆면에 고정시켰다.

오른쪽 클램프 부분에서 차바퀴의 무게는 대략 100 N으로서 한 쪽 축을 고정하였다고 가정하여 회전력이 발생되는데 자동차 구동 시에 발생할 수 있는 토크는 5000N·mm이다⁽²⁾. 따라서 구속 조건으로서는 Fig. 4와 같이 등속조인트의 오른쪽 Clamp에 5000N·mm의 토크를 주어 등속조인트에 어떻게 영향을 미치는지 알아보려고 한다.

3. 해석 결과

3.1 강도 해석

Fig. 5와 6은 유니버설 조인트가 일정한 모멘트를 받았을 때 유니버설 조인트의 전변형량과 등가 응력을 해석한 결과이다^(3,4).

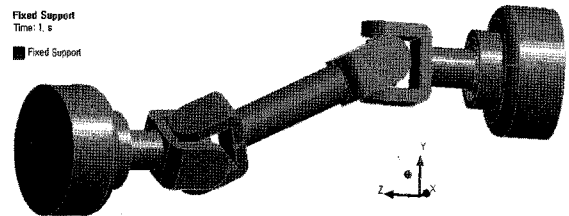


Fig. 3 Fixed support

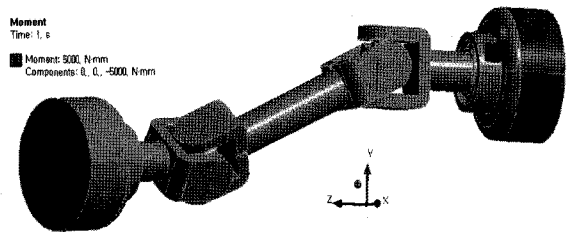


Fig. 4 Moment condition

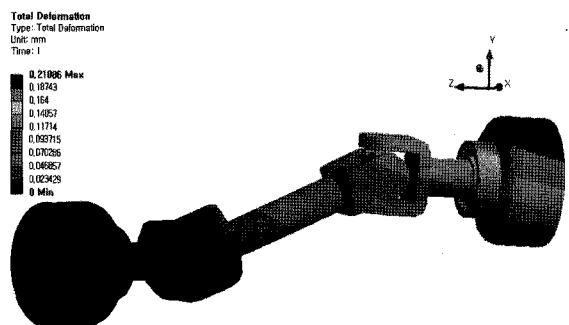


Fig. 5 Contour of total deformation at 5000N · mm

Fig. 5에서는 유니버설 조인트 오른쪽 Clamp부분에서 0.21086 mm로 가장 많이 변형이 일어난 것을 볼 수 있다.

Fig. 6에서는 유니버설 조인트의 요크 부분에서 60.755MPa로서 응력이 가장 많이 작용하였음을 볼 수 있다.

3.2 피로해석

본 연구에서는 유니버설 조인트에 Fig. 3에서와 같이 고정 조건을 주고 Fig. 4에서와 같이 등속조인트의 오른쪽 Clamp가 회전하면서 피로를 받는 경우로서 모멘트 하중을 주어 피로 해석^(5,6)을 수행하였다. Fig. 7은 피로 해석시, 해석 모델의 재료에 대한 것으로 x축상에서는 Cycle 수이고 y축상에서는 진폭응력 값을 나타낸 그림들이다. Fig.7에서와 같이 3.16×10^6 의 Cycle 수를 벗어난다면 10^9 Cycle로 적용되는 무한 수명이라고 할 수 있는 설계 수명을 적용한다. 불규칙 하중하의 피로 연구 등에서는 규칙적인 사인파인 정현파도 기본적으로 고찰하였다. 따라서 본 해석에서는 시간에 따라 임의의 한 부분에 대하여 하중을 변화시킬 수 있는데, Fig. 8과 같이 주행하는 실제 차량이 받을 수 있는 불규칙 진폭하중들인 ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’, 규칙적인 ‘Sine Wave’와 같이 기본하중에 대한 배율들을 나타내고 있다. 또한 진폭 응력이 S-N 곡선의 범위를 벗어난다면 무한 수명 값이 사용되는데, 본 연구에 있어서는 설계 수명인 무한 수명으로서 10^9 Cycle로 정하고 있다.

피로에 대한 해석 결과의 출력들은 피로 수명, 파손, Rainflow 매트릭스 및 Damage 매트릭스들을 포함하고 있다. 각각의 출

력들은 불규칙 진폭하중들인 ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’, ‘Sine Wave’의 하중들로서 서로 비교 될 수 있다. 본 연구의 모델에 대하여 사용 가능 수명에 대한 등고선 그림들이 Fig. 9에 나타나 있다. 이 결과는 모델 전체에 걸쳐서 계산 될 수 있는데 불규칙 진폭 하중으로 본 모델에 작용됨으로써 이 결과의 등고선 그림들은 주어진 피로 분석에 대하여 사용 가능한 수명을 보여 주고 있다. Fig. 9에서 보면 (a)의 경우의 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket’의 경우가 사용 가능 수명이 3.3693×10^5 Cycle 정도로 가장 짧은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sine Wave’의 경우가 그 수명이 1×10^9 Cycle 정도로 가장 긴 것을 알 수 있었다.

Fig. 10에서 볼 수 있는 바와 같이 등고선으로 된 피로 손상은 설계 수명을 사용 가능 수명으로 나눈 것으로 정의된다. 피로 손상이 아주 적은 부분으로서 3가지 경우들을 공히 비교할 수 있다. Fig. 10에서 보면 (a)의 경우인 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket’의 경우가 손상이 7984.9로 가장 많은 것을 볼 수가 있다. ‘SAE transmission’의 경우 그 손상이 1927.3 정도로 가장 적은 것을 알 수 있었다. 따라서 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 있는 ‘SAE transmission’은 아주 완만하게 변하는 ‘Sine Wave’의 경우보다도 파손이 덜 일어남을 보이고 있다. 따라서 사용 가능한 수명에 대한 Fig. 9는 피로 해석에 있어서 등속 조인트가 각 부분에서 견딜 수 있는 모델에서 피로 수명에 대한 등고선으로 표시한 것으로서 설계시에 필요한

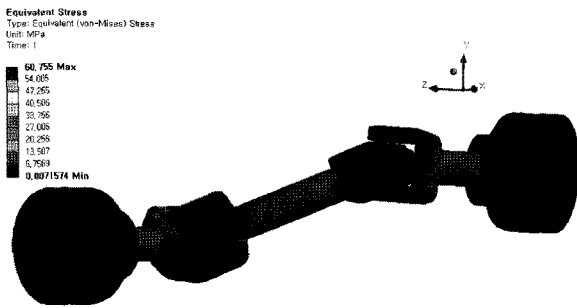


Fig. 6 Contour of equivalent stress at 5000N · mm

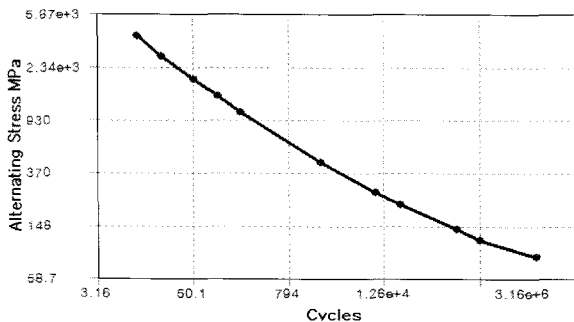
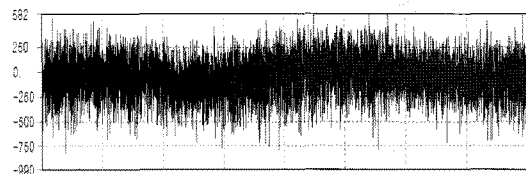
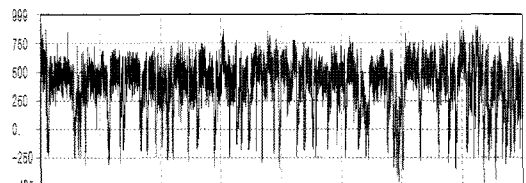


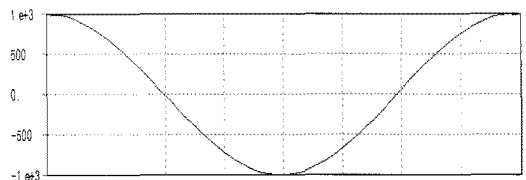
Fig. 7 S-N Curve in fatigue



(a) SAE bracket history



(b) SAE transmission



(c) Sine wave

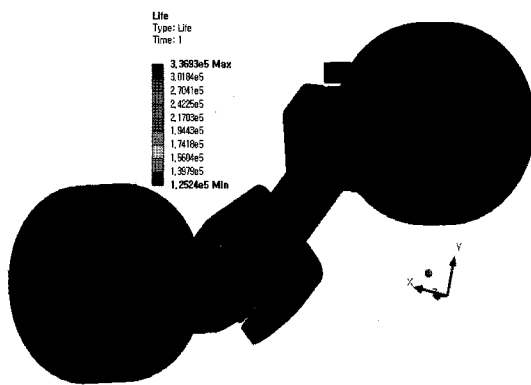
Fig. 8 Loading history

자료가 되리라 사료된다. 그리고 Fig. 10은 설계 수명에서의 피로에 대한 손상정도를 모델에 나타내고 있어 본 연구 모델에 대한 안전 설계에 대하여도 고려 될 수 있다.

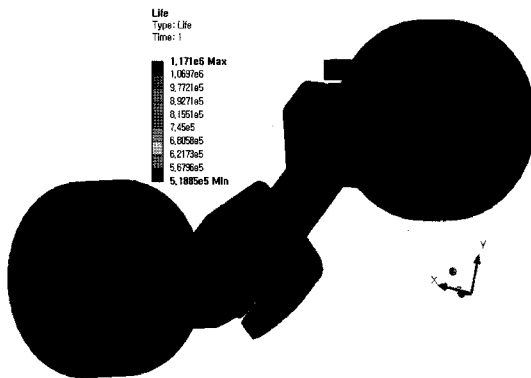
Fig. 11은 임계 위치에 대한 Rainflow 매트릭스들에 대한 그림들로서 ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’, ‘Sine Wave’들의 3가지 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용된다. 임계 위치는 가로 세로 상에서의 진폭응력과 평균응력 상에서의 위치를 말한다. Fig. 11은 본 해석에 가해지는 하중 내역으로 인한 진폭 응력과 평균 응력에 대한 그 빈도수들로서 그려지는데, z축은 주어진 진폭 응력과 평균 응력에 대한 빈도수에 해당된다. Fig. 11에서 보면 ‘SAE bracket history’의 경우가 상

대적인 손상은 평균응력이 0부근의 상태에서 최대의 빈도수가 80정도로서 상대적인 손상을 많이 일으켜 어떤 다른 경우들보다 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었다. 또한 ‘Sine Wave’가 0.7정도로서 손상을 가장 적게 일으켜 그 파손의 가능성이 가장 적음을 알 수 있었다.

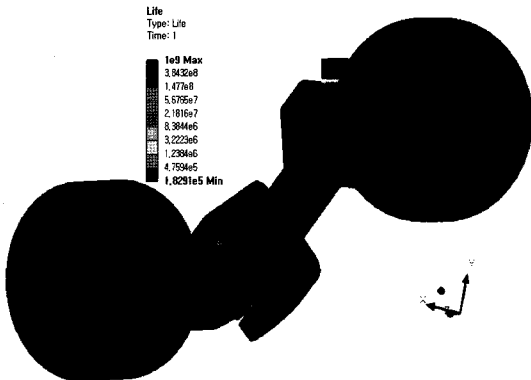
Fig. 12는 본 연구 모델에서 파손에 대한 임계 위치에서의 Damage 매트릭스들에 대한 그림들로서 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용되는데 10^9 Cycle의 무한 수명에 대한 상대적 손상 가능성을 나타내고 있다. Fig. 12에서 보면 ‘SAE transmission’의 경우가 다소 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0Pa에서 최대 50%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분



(a) SAE bracket history

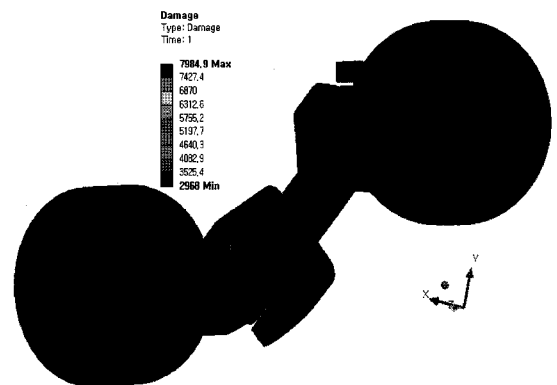


(b) SAE transmission

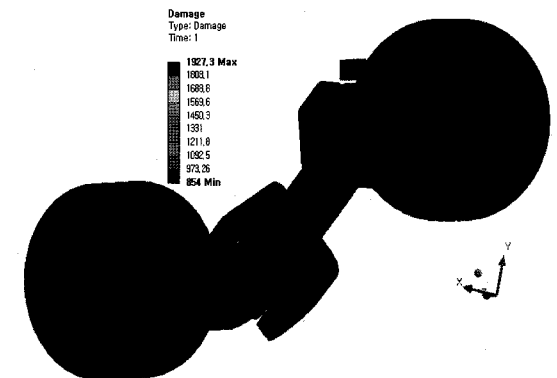


(c) Sine wave

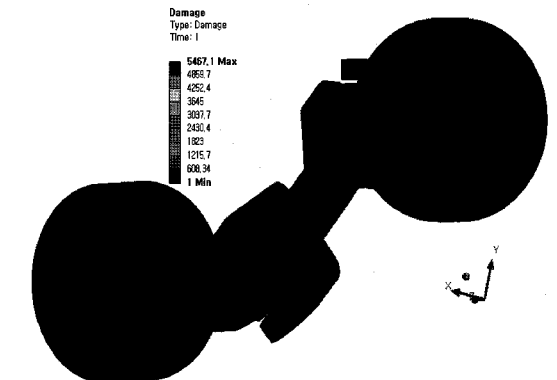
Fig. 9 Contour plots of available life histories



(a) SAE bracket history



(b) SAE transmission



(c) Sine wave

Fig. 10 Contour plots of fatigue damages

의 응력 상태가 파손의 가능성이 많다고 예측 할 수 있었다. 그러나 ‘Sine Wave’의 경우는 최대 80% 정도의 파손가능성을 보이고 있어 ‘SAE bracket history’나 ‘SAE transmission’ 경우보다 훨씬 파손의 가능성이 큼을 알 수 있었다. Fig. 11에서는 전반적으로 파손의 빈도수가 sine wave의 경우가 작아서 다음 불규칙 하중보다는 작다는 것을 의미하지만, Fig.12에서와 같이 파손의 가능성면에서 보면 sine wave의 경우가 0Pa의 평균응력의 시점인 특정 상태에서는 그 파손 가능성이 80%로 가장 불안정을 보여 파손 가능성이 가장 커졌다는 것을 의미한다. 이러한 해석 결과로서 보면, 유니버설 조인트의 물성치 및 S-N 곡선과 도로에서의 피로 하중이력만 정확히 입력하여 해

석한다면, 그 해석 결과는 신뢰할 수 있다고 사료된다.

3.3 진동해석

고유진동수⁽⁷⁻⁹⁾해석을 하기 위하여 Fig. 3과 같이 유니버설 조인트 오른쪽 측 옆면에 고정을 시켰다. 모달해석(Modal analysis)을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 13에서 확인할 수 있다. 고유진동수에 대한 모달해석에서는 모드 형상을 뽑아 내기 위한 결과 값으로서 변위를 본 것이다. 1차부터 5차까지의 고유 진동수를 보았으며, 각 모드에서의 진동수를 Fig. 13에서 확인할 수 있다. 최대의 진동수로서 5차에서 701.73 Hz로 되었으며, 이 이상의 높은 고유 진동수는 실제적으로 일어날 수

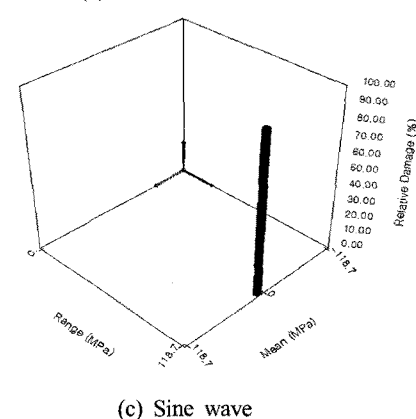
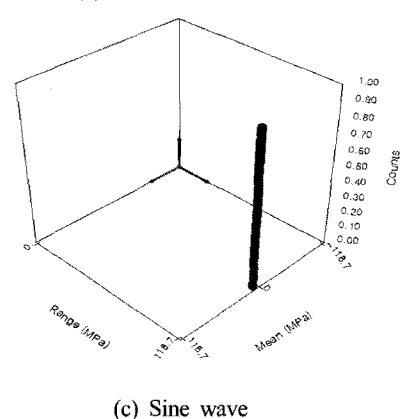
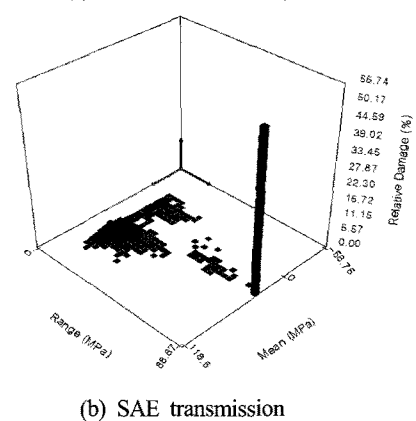
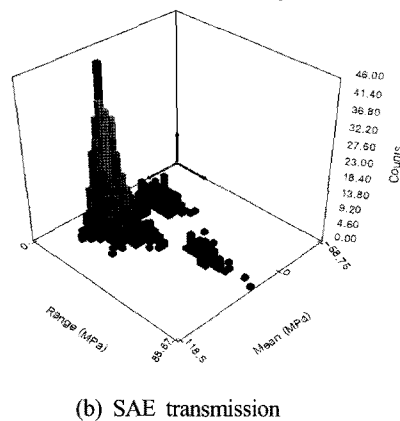
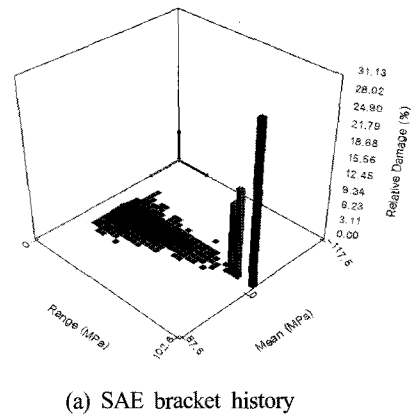
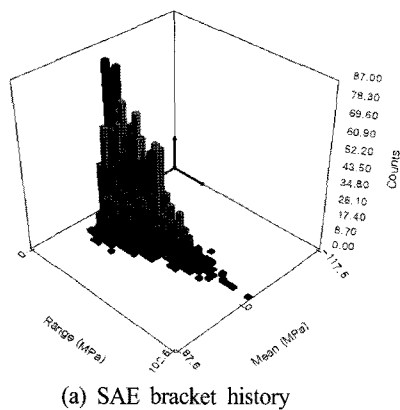


Fig. 11 Plots of rainflow matrices

Fig. 12 Plots of damage matrices

가 없으므로 모드 5까지만 수행하였다.

이러한 해석 결과를 통하여 차바퀴 회전 시 유니버설 조인트의 강도 및 내구성을 점검한다면 유용하게 현장 설계에 이용할 수 있다고 사료된다.

4. 결론

자동차 운행 중 불규칙한 피로 하중을 받는 유니버설 조인트에서의 피로 수명과 그 손상의 가능성 및 강도 해석을 할 수

있었는데, 본 연구를 통하여 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

- (1) 유니버설 조인트에서의 최대 von Mises 등가 응력과 전변 형량은 요크 부분에서 60.755MPa 및 0.21086mm로 크게 나타났다.
- (2) 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket’의 경우가 사용 가능 수명이 3.3693×10^5 Cycle 정도로 가장 짧은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sine wave’의 경우가 그 수명이 1×10^9 Cycle 정도로 가장 긴 것을 알 수 있었다. 그러나 손상의 정도는 비교적 하중의 변화가 있는 ‘SAE Transmission’이 아주 완만한 하중 변화를 보이는 ‘Sine wave’의 경우보다 가장 손상의 정도가 적음을 보이고 있다.
- (3) ‘Sine wave’는 빈도수가 0.7정도로서 손상이 가장 적게 일어나 그 파손의 가능성이 가장 적음을 알 수 있었으나 ‘Sine wave’의 경우는 평균 응력이 0Pa에서 최대 80% 정도의 파손가능성을 보이고 있어 ‘SAE bracket History’나 ‘SAE transmission’ 경우보다 훨씬 파손의 가능성이 큼을 알 수 있었다.
- (4) 고유 진동수는 1차부터 5차까지 보았으며, 최대의 진동수로는 5차에서 701.73Hz까지 나타났다.
- (5) 본 연구의 결과를 종합하여 유니버설 조인트에 응용한다면 그 파손 방지 및 내구성을 검토·예측하는데 활용이 클 것으로 사료된다.

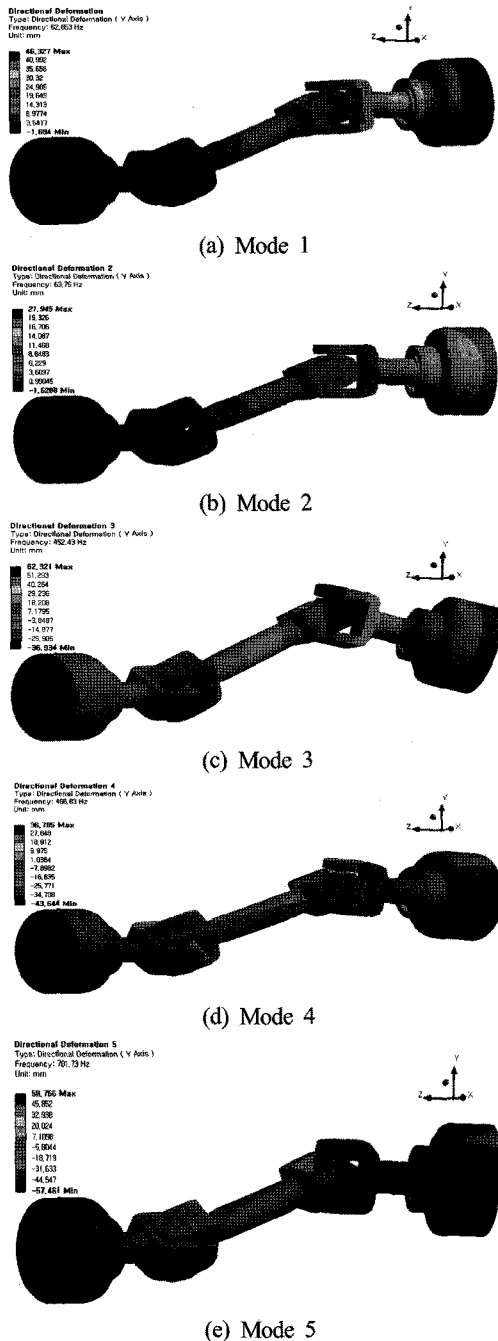


Fig. 13 Directional deformations of modal analysis at modes

후기

본 연구는 한국연구재단 국제협력연구사업 (D00004) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- (1) Swanson, J., 2009, *Ansys 12.0*, Ansys Inc, USA.
- (2) Song, M. E., Lim, Y. H., Cho, H. J., and Bae, D. S., 2010, “Multi-body Dynamic Analysis for Tripod Constant Velocity Joint,” *Transactions of KSAE*, Vol. 18, No. 1, pp. 1~7.
- (3) Kwon, H. H., Moon, K. J., and Song, S. E., 2010, “Forging Process Analysis of the Multi-forging Die for the United Universal Pipe Joint of the Intermediate Shaft,” *Journal of the KSMTE*, Vol. 19, No. 1, pp. 33~41.
- (4) Cho, J. U., Kwon, O. B., and Han, M. S., 2010, “Structural Strength Analysis of Automotive Suspension,” *Journal of the KSMTE*, Vol. 19, No. 1, pp. 89~93.

- (5) Park, W. C., Huh, S. C., Jung, J. W., Lee, H. W., and Boo, M. H., 2003, "A Study on Fatigue Crack Behavior of Metal Matrix Composites for Automobile Engine," *Transactions of KSAE*, Vol. 11, No. 5, pp. 140~146.
- (6) Tanaka, S., Ichikawa, M., and Akita, S., 1984, "A Probabilistic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 20, No. 3, pp. 501~513.
- (7) Kato, M., Ota, H., Kim, J. R., and Kato, R., 1997, "Unstable Vibrations of a Rotating Shaft Driven through a Universal Joint," *Asia-Pacific Vibration Conference '97*, pp. 236~241.
- (8) Kim, B. S., 2005, "An Study on Vibration Characteristics of Automobile Al-alloy Wheel," *Trans. of KSMTE*, Vol. 14, No. 3, pp. 122~127.
- (9) Lee, T. K., and Kim, B. S., 2004, "Vibration Characteristics of Automobile Suspension System Considering Tire Design Parameters," *Proceedings of the KSME 2004 Fall Annual Conference*, pp. 805~810.