

# 불도저의 구조해석에 의한 내구성 연구

한문식\*, 조재웅<sup>+</sup>

(논문접수일 2011. 03. 16, 심사완료일 2011. 05. 04)

## Study on Durability by Structural Analysis of Bulldozer

Moon-Sik Han\*, Jae-Ung Cho<sup>+</sup>

### Abstract

This study analyzes the behaviors on stress, fatigue and vibration about bulldozer in operation. Maximum equivalent stress is shown with the frequency of 100 Hz in case of the harmonic vibration analysis applied with force. Among the cases of nonuniform fatigue loads, 'SAE bracket history' with the severest change of load becomes most unstable but 'Sample history' becomes most stable. In case of 'Sample history' with the average stress of 0 to -105MPa and the amplitude stress of 0 to 1.617×105MPa, the possibility of maximum damage becomes 3.23%. This stress state can be shown with 5 times more than the damage possibility of 'SAE bracket history' or 'SAE transmission'. The structural result of this study can be effectively utilized with the design of bulldozer by investigating prevention and durability against its damage.

**Key Words :** Bulldozer(불도저), Natural frequency(고유 진동수), Harmonic vibration(하모닉진동), Nonuniform fatigue loads(불규칙 피로 하중들), Fatigue life(피로수명), Fatigue damage(피로 손상), 레인플로우(Rainflow)

## 1. 서론

불도저는 건설기계 가운데에서 가장 초기부터 사용되기 시작한 건설기계로서 토목공사에서 송토, 굴토, 삭토 및 황토 작업을 수행하는 데 주로 사용된다. 건설기계를 대표하는 중장비로서 평가를 받고 있던 불도저는 굴삭기의 일반화 및 급속한 사용으로 그 대표성을 상실하여 가고 있으나 앞으로도 계속하여 공사 현장에서는 기본적인 토목공사용 건설기계로 활용도가 지속될 것이다<sup>(1,2)</sup>. 불도저의 작업량을 최대화하기 위하여는 적절한 용량의 차체와 브레이드를 조합시키는 것이 가장 기본적이다. 불도저의 원활한 작업을 위해서는 불도저의 중량과 엔진의 출력은 불도저의 작업 대상 토사량에 따라 결정하여

야 한다. 이때 가장 중요한 것이 브레이드의 종류이다. 브레이드의 종류에 따라 불도저가 송토하는 토사 등의 양이 결정되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 불도저의 작업은 유압 실린더와 브레이드에 가장 많은 영향을 받으므로 이 부분들을 포함한 불도저 전체를 시뮬레이션하여 진동 및 피로 하중에 따른 수명 및 파손 등 내구성을 해석하였다<sup>(3-5)</sup>.

## 2. 모델링 및 경계 조건

### 2.1 연구 모델

본 연구에서는 불도저의 브레이드부와 연결되는 부분을 모델로 삼고 브레이드와 유압실린더에 힘을 주었을 때 나타

\* 계명대학교 기계자동차공학과  
<sup>+</sup> 교신저자, 공주대학교 기계자동차공학부 (jucho@kongju.ac.kr)  
주소: 330-717 충청남도 천안시 공업대길 34

나는 변형량과 응력을 구한다. 모델의 형상은 실제 불도저의 모양을 참조하여 CATIA를 이용하여 모델링한 후 ANSYS를 이용하여 해석하였다<sup>(5)</sup>. 해석 대상의 메시 모양은 Fig. 1과 같고 절점수 및 요소수는 각각 46374 및 22236이다. 또한 이 모델은 보편적으로 구조용 강으로 이루어져 있으며 그 물성치가 Table 1에 나타났다.

### 2.2 모델의 경계조건

모델의 경계조건은 Fig. 2와 같이 연결부의 뒷면에 완전히 고정을 시켰으며, Fig. 2에서는 유압실린더에 Force를 2,000N의 구속을 주고 브레이드 면에 1,000N의 구속을 주어 불도저가 받는 압력이 어떻게 영향을 미칠지 알아볼 수 있도록 설정하였다.

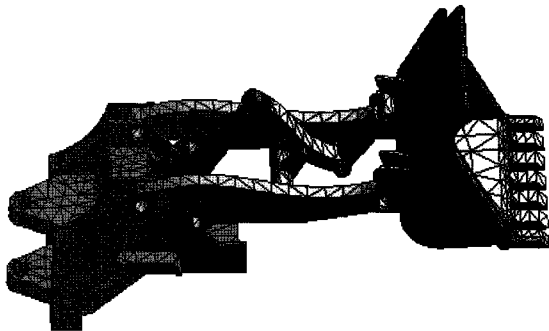


Fig. 1 Mesh shape of bulldozer

Table 1 Material property of structural steel

Young's Modulus(MPa)	71,000
Poisson's Ratio	0.291
Density(g/cc)	7.87
Tensile Yield Strength(MPa)	50
Compressive Yield Strength(MPa)	280
Tensile Ultimate Strength(MPa)	310
Compressive Ultimate Strength(MPa)	0

Static Structural  
Time: 1, s

■ Fixed Support  
■ Force: 2000, N  
■ Force 2: 1000.

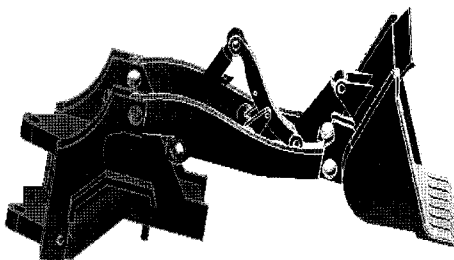


Fig. 2 Boundary condition

### 3. 해석결과

본 연구 모델에 대한 정적인 구조해석을 하였다. 모델의 경계조건은 Fig. 2와 같으며, Fig. 3과 4는 유압실린더에 2000N의 정적 힘을 가했을 때 등가응력과 최대 변형량을 나타낸 그림이다. Fig. 3은 유압실린더 부분에서 최대 등가응력이 255.11MPa를 나타낸 그림이다. Fig. 4는 날부분에서 최대 변형량을 나타낸 그림으로서 0.46422mm 변형된 것을 알 수가 있다.

#### 3.1 피로 해석

모델의 경계조건은 Fig. 2와 같으며, 불도저가 받는 피로 하중에 의한 피로수명과 파손에 대해서 해석하였다<sup>(6)</sup>. Fig. 5와 같이 피로 하중의 내역들로서 'SAE bracket history', 'SAE transmission' 및 'Sample history'이고 Fig. 6과 같이 'SAE bracket history'가 그 최대 수명이  $3.3693 \times 10^5$  Cycle로 그 수명이 가장 작음을 알 수 있다.

Fig. 7에서 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. 7에서 보면 (C)의 경우인 하중의 변화가 극심한

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1

255.11 Max  
226.77  
196.42  
170.08  
141.73  
113.38  
85.039  
56.692  
28.346  
1.2167e-5 Min

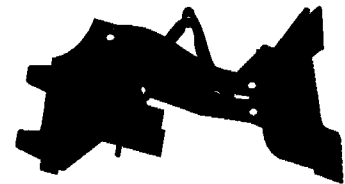


Fig. 3 Equivalent stress of applied 2000N force at hydraulic cylinder

Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1

0.46422 Max  
0.41264  
0.36106  
0.30949  
0.2579  
0.20632  
0.15474  
0.10316  
0.05158  
0 Min

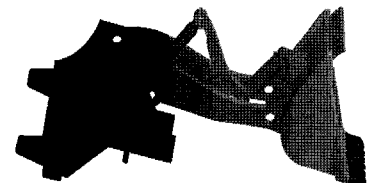


Fig. 4 Total deformation of applied 2000N force at the blade ends

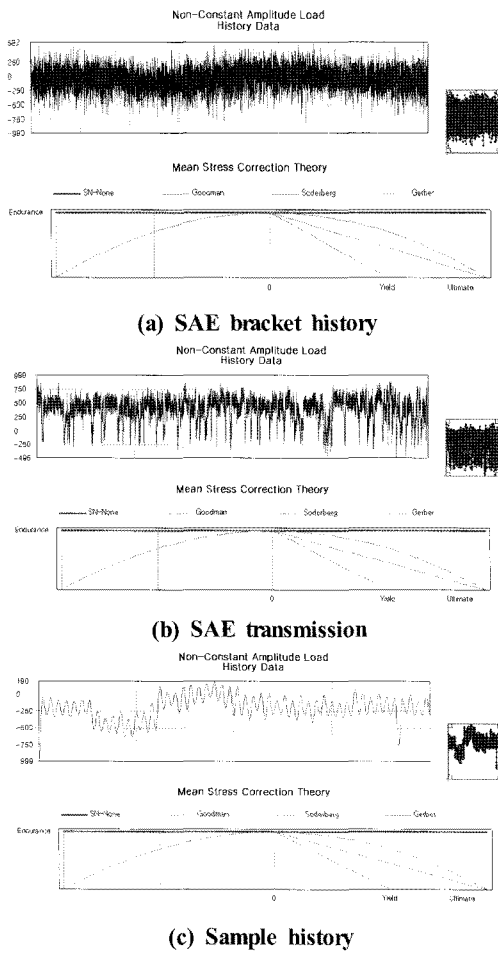


Fig. 5 Load histories at nonuniform fatigue loads

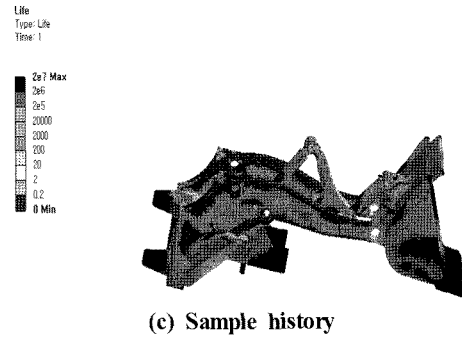
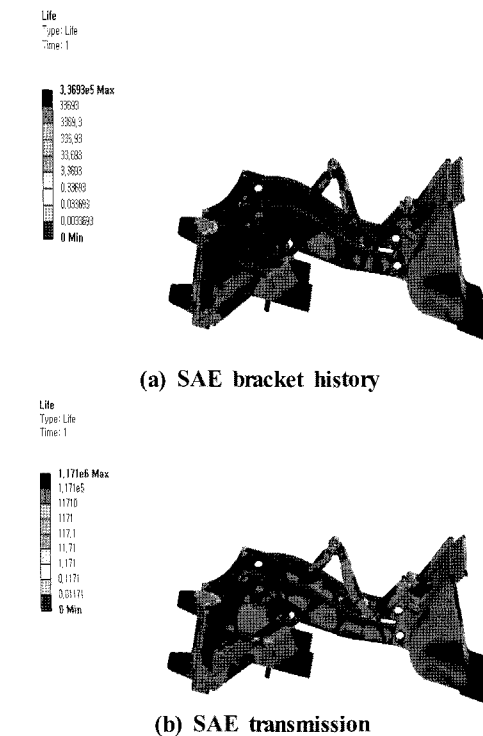


Fig. 6 Contour plots of fatigue life

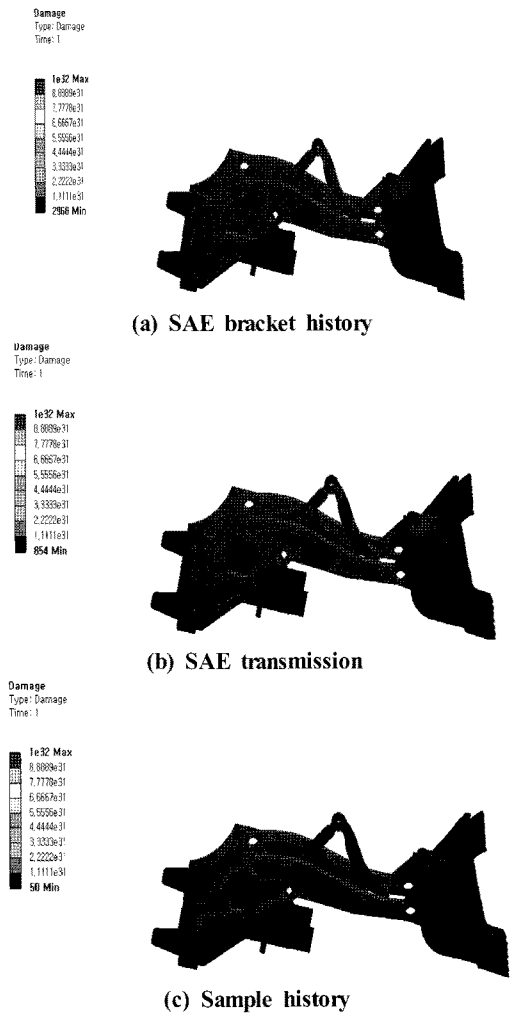
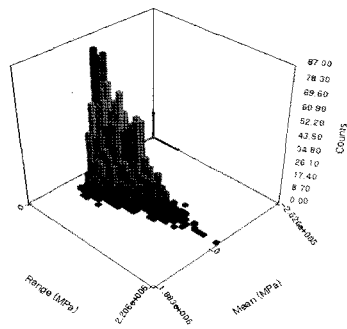
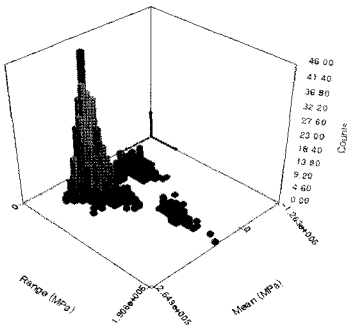


Fig. 7 Contour plots of fatigue damage

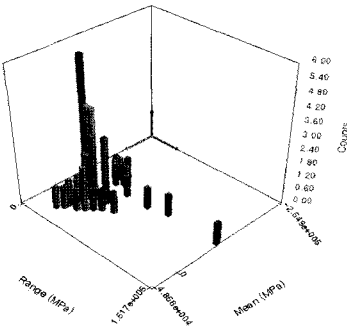
‘SAE bracket history’에서 손상이 2968로 가장 많은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우는 그 손상이 50 정도로 가장 적은 것을 알 수 있었다. 따라서 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.



(a) SAE bracket history



(b) SAE transmission

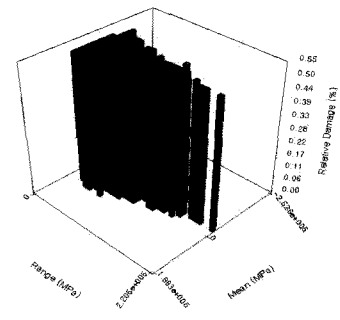


(c) Sample history

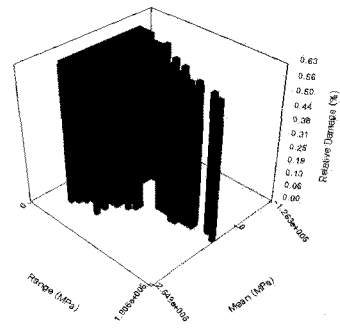
Fig. 8 Plots of rainflow matrices

Fig. 8에서 보면 ‘SAE bracket history’의 경우가 상대적 손상은 평균응력이 0 부근의 상태에서 최대의 빈도수가 87 정도로서 상대적 손상을 많이 일으켜 어떤 다른 경우들보다는 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었다. 또한 ‘Sample history’의 경우는 이 상태에서 최대의 빈도수가 6정도로서 손상을 가장 적게 일으켜 그 파손의 가능성이 가장 적음을 알 수 있었다.

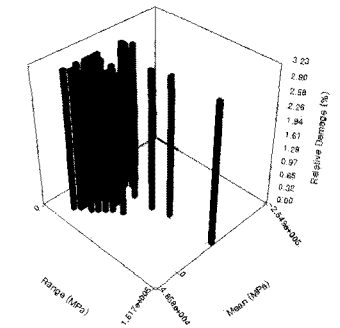
Fig. 9에서 보면 ‘Sample history’의 경우가 다소 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0 Pa부터  $-10^5$  MPa이고 응력 진폭 0 MPa부터  $10^5$  MPa에 있어서 최대 3.23%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 파손의 가능성이 많다고 예측 할 수 있었다. 그리고 ‘Sample history’의 경우가 최대 0.63% 정도의 파손가능성을 보이는 ‘SAE bracket history’나 ‘SAE transmission’의 경우보다 5배의 파손의 가능성이 큼을 알 수 있었다.



(a) SAE bracket history



(b) SAE transmission



(c) Sample history

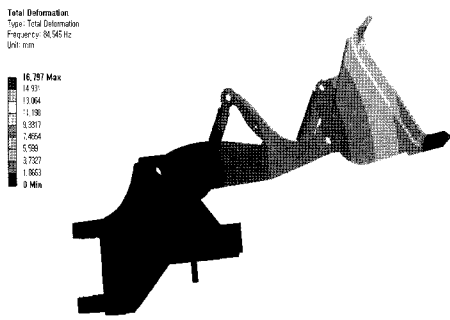
Fig. 9 Plots of damage matrices

### 3.2 진동 해석

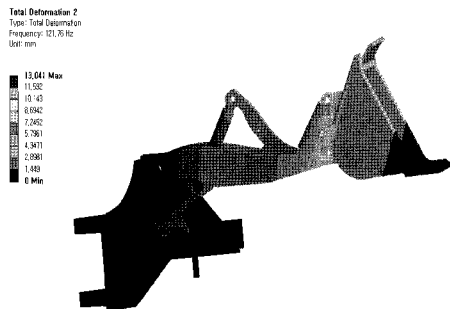
모델의 경계조건은 Fig. 2와 같이 연결부의 뒷면에 완전히 고정을 시켜서 불도저에 대하여 6차까지의 고유진동수 해석을 하였다<sup>(7)</sup>.

Fig. 10에서와 같이 고유진동으로 인한 변형량을 볼 수가 있다. 클러치 어셈블리에서 3차 진동인 163.84Hz에서 최대 21.843mm가 변형된 것을 알 수가 있다.

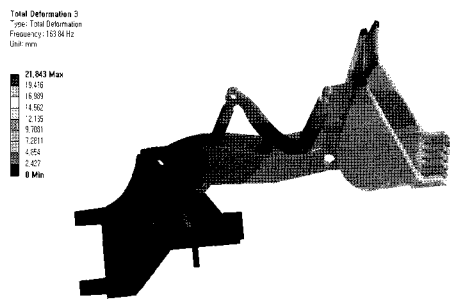
그리고 실제적으로 Fig. 2에서와 똑같이 불도저의 유압실린더와 브레이크의 뒷면에 Force를 각 2,000N과 1,000N의 구속을 주어, 불도저에 생기는 하모닉 진동에 대하여 해석해 보았다. 진동수의 범위는 1000Hz까지로 설정하였다. 앞에 Modal 해석의 결과를 보게 되면 4차 모드의 고유진동수가 1000Hz범위 내에 있기 때문에 가진주파수 영역을 맞춰 공진 주파수를 확인하였다<sup>(8)</sup>. 진동수 응답은 본 Fig. 11에서 보면 알 수 있듯이 100Hz에서 최대의 진폭변위가 0.215mm로 생



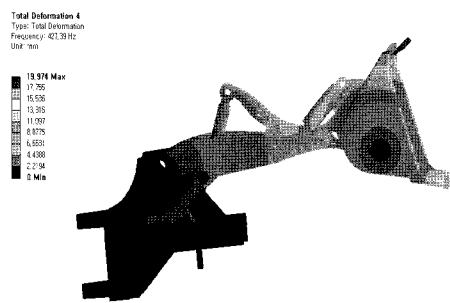
(a) Natural frequency at 1'st order



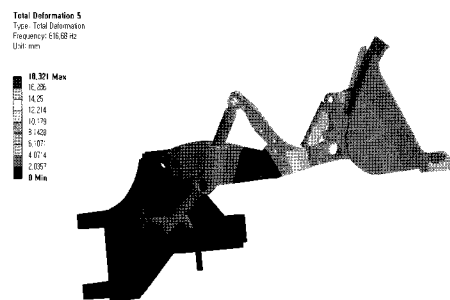
(b) Natural frequency at 2'nd order



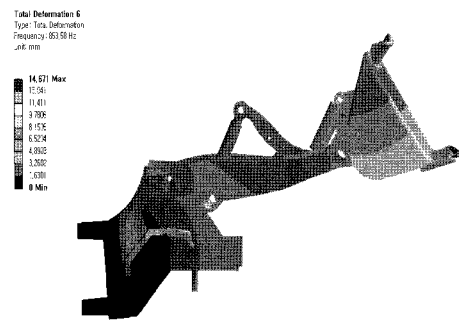
(c) Natural frequency at 3'rd order



(d) Natural frequency at 4'th order



(e) Natural frequency at 5'th order



(f) Natural frequency at 6'th order

Fig. 10 Total deformations at natural frequencies

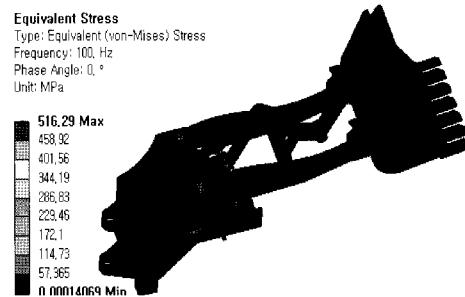


Fig. 11 Frequency response

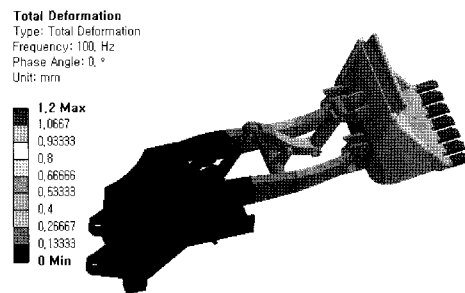


Fig. 12 Total deformation at 100Hz

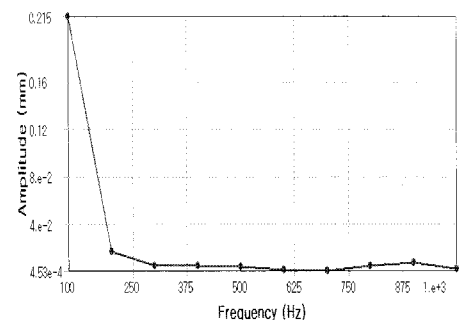


Fig. 13 Equivalent stress at 100Hz

감을 알 수 있다. 이 100Hz에서 실제적으로 최대의 응력을 받게 되며 전변형량과 등가응력은 각각 Fig. 12 및 13과 같이 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 작업 중인 볼도저에 대한 진동 및 피로 하중에 따른 수명 및 파손 등 내구성을 해석하였다. 이에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 유압실린더 부분에서 최대 등가응력이 255.11MPa을 나타냈고 날부분에서 최대 변형량을 나타낸 것을 알 수가 있다.
- (2) 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 'SAE bracket history'의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 'Sample history'의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.
- (3) 'Sample history'의 경우가 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0부터  $-10^5$ MPa 이고, 응력 진폭 0 부터  $1.617 \times 10^5$ MPa 에 있어서 최대 3.23%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 'SAE bracket history'나 'SAE transmission'의 경우보다 5배의 파손의 가능성이 많다고 예측할 수 있었다.
- (4) 실제 하중 조건에서의 100Hz의 하모닉 진동수에서 최대 변형량 및 변형을 일으킴을 보이고 있다.
- (5) 본 연구의 결과를 종합하여 볼도저의 설계에 응용한다면 그 파손 방지 및 내구성을 검토, 예측하는데 활용이 클 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

- (1) Sohn, I. S., and Lee, J. G., 2008, "A Study of Electrical Control Kit for Damping Force of Automotive Shock Absorber," *Transactions of KSAE*, Vol. 16, No. 3, pp. 1~6.
- (2) Shin, O. C., Jung, S. R., Chung, W. J., Kim, J. M., and Park, S. S., 2004, "Development Portable Measurement System for Property Test of Manual Transmission Car," *Proceeding of the KSMPE Spring Conference 2009*, pp. 221~224.
- (3) Jeong, S. H., Kim, J. Y., and Na, Y. C., 2001, "Dynamic Characteric Analysis of Tilting Turret Systems Using Finite Element Modelling," *Transactions of KSMTE*, Vol. 10, No. 5, pp. 60~70.
- (4) Lee, S. P., Kang, K. W., Chang, S. M., and Lee, J. H., 2011, "Structural Design for 2 kW Class Wind Turbine Blade by using Design of Experiment," *KSMTE*, Vol. 20, No.1, pp. 28~33.
- (5) Swanson, John., 2009, *AUTODYN 12.0*, ANSYS Inc., USA.
- (6) Park, T. K., Kim, M. K., and Won, J. H., 2010, "Construction Stage Analysis of Hybrid Composite Cable-Stayed Girder Bridge Using Eccentrically Loaded Derrick Crane," *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 3, pp. 277~286.
- (7) Kim, Y. S., Cho, J. K., Kim, M. J., Cho, K. M., and Hyun, C. T., 2010, "A Productivity Analysis of Tower Crane Installation Progress Based on Simulation Technique," *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 10, No. 2, pp. 33~40.
- (8) Seong, S. H., Lee, J. M., Lee, M. J., Kim, D. K., Yoon, S. H., 2006, "Pressure Model Test of Container Crane," *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 10, No. 1, pp. 109~118.