

## 내구성을 고려한 하부 컨트롤 암의 구조설계

박한석\*, 김종규\*, 서선민\*\*, 이권희\*\*\*, 박영철#\*\*\*

### Structural Design of a Front Lower Control Arm Considering Durability

Han-Seok Park\*, Jong-Kyu Kim\*, Sun-Min Seo\*\*, Kwon-Hee Lee\*\*\*, Young-Chul Park#\*\*\*  
(Received 16 September 2009; received in revised form 1 December 2009; accepted 8 December 2009)

#### ABSTRACT

Recently developed automotive components are getting lighter providing a higher fuel efficiency and performance. Following the current trend, this study proposes a structural optimization method for the lower control arm installed at the front side of a Vehicle. Lightweight design of lower control arm can be achieved through design and material technology. In this research, the shape of lower control arm was determined by applying the optimization technology and aluminum was selected as a steel-substitute material. Strength performance is the most important design requirement in the structural design of a control arm. This study considers the static strength in the optimization process. For the optimum design, the durability analysis is performed to predict its fatigue life. In this study, the kriging interpolation method is adopted to obtain the minimum weight satisfying the strength constraint. Optimum designs are obtained by the in-house program, EXCEL-Kriging. Also, based on the optimum model obtained for the static strength, the optimization of Index of Fatigue Durability is carried out to get th optimum fatigue performance.

Key Words : Front Lower Control Arm(전륜 하부 컨트롤 암), Shape Optimization(형상최적설계), Kriging(크리깅), Aluminum(알루미늄), Index of Fatigue Durability(피로 내구성 지수)

#### 1. 서 론

자동차 부품 업계에서는 자동차 부품의 모듈화 및 경량화를 통해 개발 비용의 절감과 에너지 효율성을

높이기 위해 노력하고 있다. 차량의 경량화 설계를 위하여 일부 부품들은 시작 설계단계 부터 그램(gram)단위까지 목표중량을 설정하여 개발되고 있다. 이는 자동차 부품 경량화 설계의 중요성을 보여주는 단적인 예이다.<sup>1)</sup> 그러므로 부품 설계단계에서 품질을 향상시키지 않으면 완성차 품질의 향상은 기대하기 힘들다.

특히 현가장치(suspension)는 승차감(ride comfort)과 조종 안전성(handling performances)에 대한 소비자들의 인식이 높아감에 따라, 고속 주행시 차량의 주행

\* 동아대학교 대학원 기계공학과

# 교신저자 : 동아대학교 기계공학과

E-mail : parkyc67@dau.ac.kr

\*\* (주)센트랄 중앙연구소

\*\*\* 동아대학교 기계공학과

성능을 확보하는 동시에 경량화를 통한 현가장치의 최적설계가 요구되고 있다.<sup>2)</sup> 현가장치의 성능은 장치가 차지하는 공간과 너클(knuckle) 및 컨트롤 암(control arm)의 조향 안전성 등에 의해 결정이 된다. 그 중 차축에서 프론트 액슬(front axle)과 크로스 멤버(cross member)를 연결하는 구조인 암은 승차감과 조종 안정성에 영향을 미치는 현가장치의 핵심부품으로서 소재변경과 경량화에 상반되는 강도 및 내구성에 따른 안전성 여부의 검토 및 그에 만족하는 최적설계의 요구가 필수적이다.

본 연구에서 적용한 컨트롤 암은 전륜용 하부 컨트롤 암이다. 이 제품을 기존 모델로 강도 및 내구성을 고려한 최적화 기술을 이용하여 최적의 컨트롤 암 형상을 제시하고자 한다.

본 연구에서 적용한 최적화 기법은 크리깅<sup>1,3,4)</sup>을 이용한 메타모델 방법과 내구성을 고려한 시행착오법이다. 메타모델을 이용한 최적화 방법은 계산시간이 오래 소요되는 해석이 포함된 경우, 복곡면 등이 존재하여 형상변수의 정의가 어려운 경우, 또는 최적화 진행 중에 유한요소의 왜곡이 심하거나 깨지는 경우 등의 설계문제에 적합하다. 반면에 상용프로그램에 내장되어 있는 민감도를 이용한 고전적인 형상 최적설계 방법은 위에 열거한 문제의 해결에는 한계가 있다.

본 연구에서는 먼저 관성력 해석을 위한 4가지의 하중조건 중 최악하중을 선정하여 이를 고려한 최적해를 산출하고 나머지 하중조건에 대해서도 검토를 한다. 유한요소해석 시 구속조건이 필요 없는 관성 제거기법(inertia relief analysis)<sup>5)</sup>을 이용하였다. 형상 설계변수는 CAD 모델에서 정의하며 크리깅 메타모델을 구성하기 위한 표본점에서 최대응력 및 중량의 반응치를 계산한다. 즉, 중량 및 최대응력에 대한 크리깅 메타모델을 가지고 최적화를 수행하는 것이다. 본 연구에서는 이 과정을 엑셀에서 구현 가능하도록 비주얼 베이직으로 EXCEL-kriging 프로그램을 개발하여 관성력을 고려한 최적화 결과를 산출 하였다.

또한 관성력을 고려한 최적화 모델을 초기 모델로 사용하여 내구성능 평가를 실시하였다. 내구성능 평가를 위해 등가응력을 사용한 준정적 내구해석을 수행하였다. 이러한 피로 해석결과를 바탕으로 시행착오법을 이용하여 최적화 방안을 모색하였다. 관성력

해석을 수행하기 위해서 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS WORKBENCH를 이용하였으며, 내구성능 평가를 위해 MSC.Fatigue를 이용하였다.

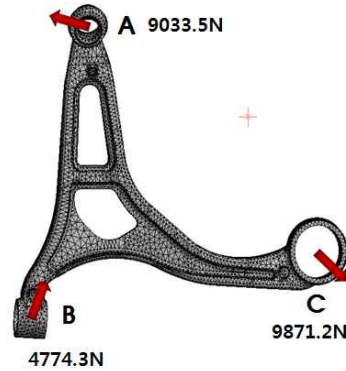


Fig. 1 FE model of control arm

## 2. 컨트롤 암의 관성력 형상 최적화

### 2.1 하중조건과 초기 유한요소 해석결과

완성차 업체나 컨트롤 암 제조업체들은 구조 안전성 평가를 위한 하중조건과 그에 상응하는 기준을 가지고 있다. 본 연구에서는 A 업체에서 사용되고 있는 관성력 하중 4가지를 고려하였으며, 관성력 하중조건을 Table 1에 나타내었다. 또한 이 중 가장 엄격한 하중조건을 고려하여 최적화를 수행 하였다.

하부 컨트롤 암의 초기 유한요소 모델을 Fig. 1에 표시 하였다. 유한요소 모델 생성 시 3 자유도를 가지는 사면체 요소를 사용하였으며 요소의 크기는 수렴해석을 통하여 5mm로 결정 하였다. 컨트롤 암과 다른 요소와 연결되는 하드 포인트(hard point)를 Fig. 1에서 A, B, C로 표시하였다.

최적화 수행에 적용된 재료는 알루미늄합금 소재인 Al6061M6로서 대표적인 재료 물성치를 Table 2에 정리하였다.

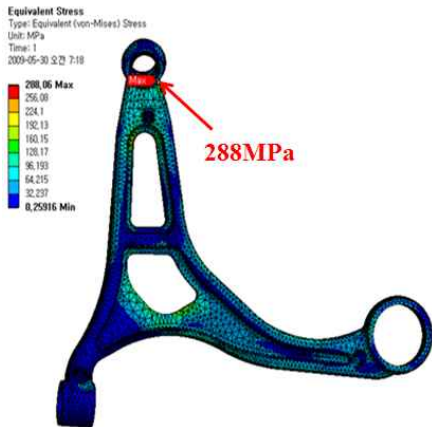
초기 모델의 최악 하중조건에 대한 강도해석 결과를 Fig. 2에 표시하였다.

**Table 1 Load cases for static analysis**

Load case		Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)
Load 1	A	-336	1485	-45
	B	173	-1493	55
	C	162	8	-11
Load 2	A	8842	1800	429
	B	-1313	4582	-275
	C	-7529	-632	-155
Load 3	A	-1297	-6463	329
	B	-369	4672	-264
	C	1665	1792	-65
Load 4	A	-851	4211	1
	B	496	-4151	105
	C	355	-59	-105

**Table 2 Material Property of Al6061M6**

Al6061M6	
Yield Stress(MPa)	340
Tensile Strength(MPa)	380
Young's Modulus(MPa)	72,000
Density(kg/mm <sup>3</sup> )	2.71×10 <sup>-6</sup>



**Fig. 2 Equivalent stress distribution of the initial design**

초기모델에서의 검토되는 응력인 최대 폰미제스 응력(von-Mises stress)은 288.06MPa를 나타내고 있으

며 중량은 2209.2g이다. 이 하중조건에서 A 사의 정강도 평가기준은 재료의 항복응력으로 설정되어 있다.

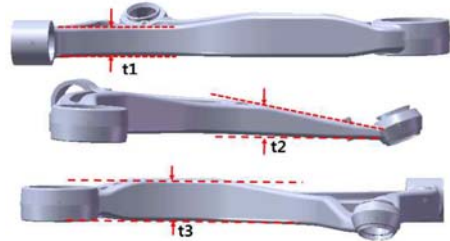
초기모델에 대한 해석결과가 항복강도보다 낮은 결과를 가지므로 충분히 경량화를 시킬 수 있는 여지가 있다고 판단하여 본 연구에서 컨트롤 암의 구조최적화를 수행하였다.

## 2.2 최적설계 정식화 및 절차

초기 유한요소 해석결과를 바탕으로 메타모델을 이용한 형상최적설계를 수행하였다.

형상설계변수는 CAD 모델에서 Fig. 3과 같이 정의 하였다. 정의된 형상설계변수는  $t_1, t_2, t_3$ 으로 총 3개이다. 다음은 이 모델을 기초로 Fig. 3에서 설정한 설계변수에 의한 형상최적설계를 수행한다.

고전적인 형상최적설계방법<sup>7,8)</sup>으로는 형상설계 변수를 정의하기도 어려울 뿐더러 최적화과정 중에 요소가 파괴될 가능성이 높다.



**Fig. 3 Design variables of control arm**

이를 방지하기 위하여 본 연구에서는 메타모델을 이용한 형상최적설계를 수행하였다. 하부 컨트롤 암의 형상최적설계를 위한 정식화는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} && W(t_1, t_2, t_3) \\
 &\text{Subject to} && \sigma_i \leq \sigma_a \quad (i=1, \dots, n_e) \quad (1) \\
 &&& t_{iL} \leq t_i \leq t_{iU} \quad i=1, 2, 3
 \end{aligned}$$

여기서  $W$ 는 무게,  $\sigma_i$ 는 각각의 요소의 응력,  $n_e$ 는 요소의 개수이고  $\sigma_a$ 는 허용응력으로 본 연구에서는 항복강도로 설정하였다. 그리고 변수설정 범위는  $t_L=[25.6 \ 74.288 \ 35.992]$ mm 이고  $t_U=[32 \ 92.86$

44.99]mm 이다.

식 (1)에서 요소 수만 큼 메타모델을 생성하는 것은 불가능하므로 식 (1)의 정식화에서 목적함수와 응력에 관한 제한조건함수는 식 (2)와 같이 수정하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} && \widehat{W}(t) \\ & \text{Subject to} && \widehat{\sigma}_{\max} \leq \sigma_a \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\widehat{W}$ ,  $\widehat{\sigma}_{\max}$ 는 각각 중량 W와 최대응력  $\sigma_{\max}$ 에 대한 추정치를 표시한 것이다. 즉 본 연구에서는 이 반응치에 대한 크리깅 메타모델을 구성하여 최적해를 산출하였다.

본 연구에서는 최대엔트로피법 (maximum entropy method)<sup>6)</sup>을 적용하여 표본점을 생성하였다. 각 표본점에 대하여 유한요소해석을 수행한 후, 중량과 최대응력에 대한 크리깅 메타모델을 구성하고 식 (2)를 EXCEL에 내장되어 있는 최적화 알고리즘으로 해결한다.

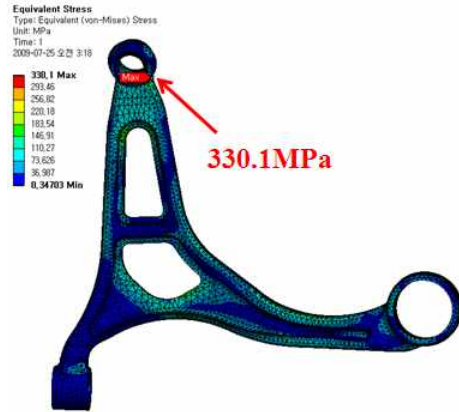
### 2.3 관성력 최적화 결과

본 연구에서는 식 (2)의 최적화 문제를 EXCEL - kriging 프로그램을 이용해서 해결하였다. 이때 표본점 생성 방법은 최대엔트로피방법을 이용하였고 표본점 수는 50으로 하였다. 각각의 실험점 및 EXCEL - kriging 프로그램을 이용한 최적화 결과를 Table 3에 표시하였다. 각 행에 대하여 유한요소해석을 수행한 것이며 중량과 최대응력을 반응치로 하여 메타모델을 생성하였다. 이때 중량 및 최대응력은 추정치가 아닌 유한요소해석을 통해 산출된 값이다. 최종 산출된 최적해 에서의 최악 하중조건에 대한 컨트롤 암의 장강도 해석결과를 Fig. 4에 나타내었다.

**Table 3 Experiment layout using maximum entropy method**

	t <sub>1</sub> (mm)	t <sub>2</sub> (mm)	t <sub>3</sub> (mm)	W (g)	σ <sub>max</sub> (MPa)
1	32	92.86	44.99	2209.2	288.06
2	28.22	83.76	36.62	2057.1	325.25
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

49	25.92	80.04	40.22	2064.3	361.59
50	25.79	87.47	42.02	2095	336.22
opti.	25.6	89.18	37.57	2027	340



**Fig. 4 Equivalent stress distribution of the optimum design**

Excel-kriging 프로그램을 이용하여 관성력을 고려한 형상 최적화를 수행한 결과 발생응력은 340MPa로 적용재료의 항복강도를 만족하고 있으며, 중량은 2027g으로 초기 중량보다 182.2g정도의 중량감소를 하였다. 최적해 에서 유한요소해석을 수행한 결과를 예측된 최대응력과 비교해보면 0.03%의 오차를 보이고 있다. 또한 비선형성이 크지 않은 컨트롤 암의 중량의 추정치는 실제 중량값과 거의 오차가 없었다. 따라서 Excel-kriging 프로그램을 이용해 구성된 크리깅 모델은 비교적 정확하다고 평가 할 수 있다.

## 3. 컨트롤 암의 내구성 형상 최적화

### 3.1 피로 수명 해석

내구수명 형상 최적화의 초기모델은 앞에서 관성력 하중을 고려하여 수행한 관성력 최적화 모델이다. 일반적으로 내구해석은 동적내구해석과 준정적 내구해석으로 나뉜다. 동적내구해석은 RLDA를 이용한 방법이고, 준정적 내구해석은 등가응력을 이용해

피로수명을 예측하는 방법이다. 본 연구에서는 준정적 내구해석을 통해 컨트롤 암의 피로수명을 평가하였다. 피로하중을 이용하여 구해진 각 절점에서의 응력이력과 컨트롤 암 재료의 변형률 수명선도 (ε-N)를 이용하여, 구조물 전체 절점에 대한 피로수명해석을 실시하였다. 피로하중 조건을 Table 4에 나타내었다. 내구해석 시 사용한 프로그램은 MSC.Fatigue이며, 내구성 평가를 위해 A 업체에서 내구성능의 기준으로 사용하는 3가지 기준을 통해 평가하였다. 또한 피로수명을 지수화 하여 기준 성능에 만족하는지 알아보았다.

**Table 4 Load cases for fatigue analysis**

Load case	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)	
Case 1	A	-336	1485	-45
	B	173	-1493	55
	C	162	8	-11
Case 2	A	4250	2926	132
	B	-585	478	-60
	C	-3665	-3404	-72
Case 3	A	-108	-3196	154
	B	-313	2679	-136
	C	421	517	-17
Case 4	A	-145	-419	-177
	B	52	456	83
	C	93	-37	94
Case 5	A	-510	-2721	33
	B	318	2656	54
	C	192	65	-88

### 3.2 피로수명 해석결과

관성력 최적화 모델의 피로수명 해석결과를 업체에서 사용하는 3가지 기준을 통해 평가 하였다. 4개의 정적해석용 하중, 하중이력 그리고 평가 기준 수명(Cycle)을 Table 5에 나타내었다. Table 5의 case1~case5의 항목은 내구해석 시 사용되는 내구하중 조건을 나타낸다. 또한 SWT (Smith- Watson-Topper) 지수로 내구성능을 평가 할 수 있다. SWT 지수는 구조물의 내구수명과 물성데이터를 이용하여

수치로 표기하는 내구성 지수이며, SWT 지수를 구하기 위한 식을 식(3)과 식(4)에 나타내었다.

$$SWT = \sigma_{max} \frac{\Delta\sigma}{2} = (\sigma'_f)^2 (2N_f)^{2b} + E\sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (3)$$

$$\text{Index of fatigue durability} = \left( \frac{(SWT)_{target}}{(SWT)_{analysis}} \right)^{0.5} \quad (4)$$

여기서 Nf는 내구 수명이고, 나머지 값은 재료의 ε-N물성 데이터이다. 그리고 (SWT)target은 목표 내구 수명의 SWT 지수이고, (SWT)analysis는 해석을 통한 내구 수명의 SWT 지수를 나타낸다. 식(3)의 Nf에 목표 내구 수명과 해석을 통한 내구 수명을 대입하여 SWT 지수를 구한다. 그리고 이 값을 식 (4)에 대입하여 이 값이 1.0 이상이면 제품의 내구 수명이 목표 내구 수명보다 높은 값을 가지는 것을 의미한다.

**Table 5 Specifications for durability assessment**

	Load	Load time histories		Cycle
		Amplitude	Signal	
1 <sup>st</sup>	case1	+1	constant	5 × 10 <sup>5</sup>
	case2	+1~1	Sine	
2 <sup>nd</sup>	case1	+1	constant	7 × 10 <sup>5</sup>
	case3	+1~1	Sine	
3 <sup>rd</sup>	(case4+case5)/2	+1	constant	2 × 10 <sup>5</sup>
	(case4-case5)/2	+1~1	Sine	

초기모델의 3가지 평가기준에 대한 내구수명 및 내구성지수를 Table 6에 나타내었다. 초기모델의 피로해석 결과를 통해 내구성능을 고려한 최적화 수행이 필요함을 알 수 있었다.

**Table 6 Result of fatigue analysis**

	1 <sup>st</sup>		2 <sup>nd</sup>		3 <sup>rd</sup>	
	analysis	target	analysis	target	analysis	target
cycles	5.9×10 <sup>7</sup>	5.0×10 <sup>5</sup>	1.0×10 <sup>7</sup>	7.0×10 <sup>5</sup>	1.0×10 <sup>20</sup>	2.0×10 <sup>5</sup>
S.W.T index	1.34		7.41		8.01	

### 3.3 시행착오법에 의한 내구수명 형상 최적화

피로수명해석 결과 3가지 기준 모두 무한수명과 목표수명 이상의 결과를 나타내었다. 관성력 최적화 모델이 내구수명을 고려한 형상최적화가 필요함을 알 수 있었다. 적용한 최적화 기법은 시행착오법을 사용하였다. 시행착오법은 설계자의 직관에 의존하는 방법이다. 본 연구에서는 관성력 최적화 모델을 기반으로 각 변수들의 치수를 감소시켜 나가는 것으로 정하였다. 즉, 관성력 최적화 모델을 100%로 두고 5%씩 치수를 감소시켜 모델을 생성하고 피로해석을 실시하였다. Fig. 5에 시행착오법에 적용할 모델을 나타내었으며, Table 6에 각 모델의 치수를 나타내었다. Table 7은 시행착오법에 의한 최적화결과를 나타낸 것으로 각 모델별 내구수명 및 내구성 지수, 중량 등을 나타내었다.



Fig. 5 Changing model for fatigue analysis

Table 6 Design variables for fatigue analysis

Model (%)	Design variables (mm)		
	t1	t2	t3
100	25.6	37.6	89.2
95	24.3	35.7	84.7
90	23	33.8	80.3
85	21.8	31.9	75.8
80	20.5	30.1	71.3
75	19.2	28.2	66.9
70	17.9	26.3	62.4

시행착오법에 의한 내구수명 형상 최적화를 수행한 결과 설계변수의 30% 감소한 크기를 갖는 모델에서 판정기준인 50만회에 근접하는 결과를 얻을 수 있었으며, 내구성 지수 또한 1에 근접한 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 이 모델의 중량은 1540.53g으로 초기모델과 비교 하였을 때 668g, 관성력 형상 최적화모델과 비교 하였을 때 493.53g의 중량감소를 보이는 것을 알 수 있었다.

Table 7 Result of fatigue analysis for case1

model	1 <sup>st</sup>	S.W.T index	weight (g)	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
initial model	5.9×10 <sup>7</sup>	1.34	2034.06	25.6	89.19	37.57
5% Down	7.17×10 <sup>7</sup>	1.36	1972.35	24.53	84.73	35.69
10% Down	7.17×10 <sup>7</sup>	1.36	1899.79	23.04	80.27	33.81
15% Down	1.05×10 <sup>7</sup>	1.21	1842.82	21.76	75.81	31.93
20% Down	4.76×10 <sup>6</sup>	1.15	1729.45	20.48	71.35	30.054
25% Down	2.13×10 <sup>6</sup>	1.09	1637.51	19.2	66.89	28.17
30% Down	5.03×10 <sup>5</sup>	1.00	1540.53	17.92	62.43	26.3

## 4. 결론

자동차 현가장치 부품인 하부 컨트롤 암의 개발 단계에서 관성력 하중 및 내구수명을 고려하여 형상 최적화를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서는 관성력뿐만 아니라 내구수명을 고려한 컨트롤 암의 형상최적설계를 위한 일련의 절차를 적용 하였으며 유용한 결과를 도출 할 수 있었다.

2) 관성력만을 고려하여 형상최적설계를 수행한 결과 초기모델 대비 약 8%(182.2g)의 중량감소를 이룰 수 있었다.

3) 내구수명을 고려하여 형상최적설계를 수행한 결과 초기모델 대비 약 30%(668g), 관성력 최적화 모델대비 약 20%(493.53g)의 중량 감소를 이룰 수 있었다.

4) 본 연구는 준정적 해석 방법만을 고려하여 최적해를 산출한 것으로써 향후 동적 내구해석인 RLDA를 이용한 해석방법을 통한 검증이 요구된다.

Design Sensitivity and Optimization User's Guide, Santa Ana, California, 2004.

8) VR & D, Inc., GENESIS Version 6.0 User's Manual, Colorado Springs, Colorado, 2000.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 산업기술재단의 지원혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## 참고문헌

- 1) K. H. Lee and D. H. Kang, "Structural Optimization of an Automotive Door Using the Kriging Interpolation Method," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 221, No. 12, pp. 1524-1534, 2007.
- 2) D. H. Lee and Y. C. Park, "Multi-objective Optimization of Lower Control Arm Considering the Stability for Weight Reduction," Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 4, pp.94-101, 2003.
- 3) J. Sacks, W. J. Welch, T. J. Mitchell and H. P. Wynn, "Design and Analysis of Computer Experiments," Statistical Science, Vol. 4, No. 4, pp. 409-435, 1989.
- 4) A. Guinta and L. Watson., "A Comparison of Approximation Modeling Techniques: Polynomial versus Interpolating Models," Proceedings of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, St. Louis, Mo, AIAA, Vol. 2, pp. 392-440, 1998.
- 5) Bessert N. and Frederich O., "Nonlinear Airship Aeroelasticity," Journal of Fluids and Structures, Vol. 21, No. 8, pp. 731-742, 2005.
- 6) DNDE, ANSYS WORKBENCH-Simulation Introduction Release 10.0, Busan, Korea, 2006.
- 7) MSC Software Corporation, MSC.NASTRAN 2004