

## 論文

## 탄소/탄소 브레이크 디스크의 열탄성 해석과 3차원 응력해석 및 설계

오세희\*, 유재석\*, 김천곤\*\*+, 홍창선\*\*, 김광수\*\*\*, 박종현\*\*\*

## Thermo-Elastic Analysis, 3-Dimensional Stress Analysis and Design of Carbon/Carbon Brake Disk

Se-Hee Oh\*, Jae-Seok Yoo\*, Chun-Gon Kim\*\*+, Chang-Sun Hong\*\*, Kwang-Soo Kim\*\*\* and Jong-Hyun Park\*\*\*

## ABSTRACT

This paper presents the thermo-elastic analysis for searching the behavior of carbon/carbon brake system during the braking period and the 3-D stress analysis to find the shape of the brake disk which is safe to the failure. The mechanical properties of the carbon/carbon brake disk were measured for both in-plane and out of plane directions. The mechanical properties were used as the input of the thermo-elastic analysis and 3-dimensional stress analysis for the brake disk. The gap between rotor clip and clip retainer is an important parameter in the loading transfer mechanism of the rotor disk. The change of gap was considered both the mechanical deformation and thermal deformation. Because the rotor clip and clip retainers were not contacted, they were excluded from the analysis model. Rotor disk was modeled by using the cyclic symmetry condition. The contact problems between rotor clip and key drum as well as between rotor disk and rotor were considered. From the results of the 3-D stress analysis, the stress concentration at the key hole of the brake disk was confirmed. The stress distributions were studied for the variation of the rotation angle of the contact surface and the radius of curvature at the key hole part.

## 초 록

이 논문에서는 탄소/탄소 브레이크 제동중 시스템의 거동을 열탄성 해석을 수행하여 살펴보고, 파손에 안정적인 디스크의 형상을 찾기 위하여 다양한 형상에 대한 3차원 응력해석을 수행하였다. 탄소/탄소 복합재료의 기계적 물성치가 적층면방향과 두께방향으로 측정되었다. 측정된 기계적 물성치는 열탄성 해석과 3차원 응력해석을 위한 입력으로 사용되었다. 로터 클립과 클립 리테이너 사이의 간격은 회전판의 하중전달 메커니즘에 있어서 중요한 인자이다. 간격변화는 기계적 변형과 열 변형으로 분리하여 고려하였다. 클립과 리테이너는 서로 접촉이 발생하지 않았으므로 해석 모델에서 리테이너와 리벳은 제외되었다. 로터 디스크는 반복대칭조건을 사용하여 모델링되었고, 로터 디스크와 로터 클립, 로터 클립과 키 드럼사이의 2중 접촉문제가 고려되었다. 3차원 응력해석의 결과로부터 브레이크 디스크의 키 홀 부분에 응력집중현상이 발생하는 것을 확인하였다. 응력분포는 키 홀 부분에서 접촉면의 회전각과 곡률반경의 변화에 따라 연구되었다.

\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

\*\*+ 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

\*\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

\*\*\* 한국항공우주산업 주식회사, 첨단복합재센터

## 1. 서론

탄소/탄소 복합재료는 고온에서 비강성과 비강도가 우수하고 적당한 마찰계수의 특성을 가지고 있어 고속 경주용 자동차나 고속전철, 항공기의 브레이크 디스크에 많이 사용되고 있다. 그 중에서 항공기에 사용되는 브레이크 디스크 시스템은 착륙 시 활주중인 항공기의 운동에너지를 마찰에너지와 마찰에 의한 열에너지로 변환하여 항공기를 정지시키는 장치이다.

항공기용 브레이크 시스템은 압력판(*pressure plate*)과, 회전판(*rotor*), 정지판(*stator*)과 끝판(*end plate*)으로 구성되어 있다. 항공기를 일정하게 감속하기 위해서는 바퀴축에 일정한 토크가 유지되어야 하며, 이를 위하여 압력판에는 시간에 따라 다른 유압이 걸리게 된다. 이 압력에 의해 디스크의 회전판과 정지판 사이에는 마찰력이 발생하게 되고, 그로 인해 마찰열이 발생하게 된다. 마찰열에 의해 디스크에는 기계적 하중과 함께 열하중이 발생한다. 이러한 하중에 대해 고도의 안정성을 요구하는 항공기의 브레이크 디스크 시스템을 개발하는 과정에서 디스크의 파손해석은 필수적인 과정이다.

현재 개발중인 모델은 회전판에 부착되는 금속 부품들이 하중전달에 아주 중요한 역할을 하므로 이들을 해석에 고려해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 회전판의 하중전달에 중요한 영향을 미치는 금속부품들 사이의 접촉을 고려한 해석을 수행하였다.

회전판의 응력해석과 설계를 하기 위해서는 우선 각 부품들의 기계적 물성치가 필수적이다. 회전판을 제외한 부품들은 초합금(*super alloy*)계열의 물질들로 구성되어 있어 물성이 측정되어 있지만, 회전판의 물성치는 새로 측정해야 한다. 따라서 탄소/탄소 복합재료의 기계적 물성치를 측정하는 연구를 수행하였다.

응력해석을 수행하기 위한 입력중의 하나로써 회전판의 마찰면에 작용하는 압력분포와 온도분포에 대한 데이터가 필요하다. 이를 위해 디스크 시스템의 열탄성 해석을 수행하였다. 그리고 회전판에 부착되는 금속부품들에 대한 온도는 제동중 발생가능한 온도분포를 가정하였다.

이와 같은 입력을 기준으로 회전판의 응력해석을 수행한 뒤, 그 결과를 바탕으로 디스크의 하중전달 메커니즘을 예측하였다. 그리고 회전판의 설계를 위한 기반으로 응력분포에 중요한 변화를 줄 수 있는 몇 가지 인자를 정하고, 인자의 변화에 따른 응력분포의 변화를 관찰하였다. 최종적으로는 해석결과를 바탕으로 파손에 안정적인 회전판의 형상을 제시하였다.

유재석[1] 등은 2차원으로 적층된 탄소/탄소 브레이크 디

스크(B32 model)의 기계적 물성을 측정하는 연구를 수행하였다. Zagrodzki[3,4]는 다판으로 구성된 금속재 브레이크 시스템의 열탄성 해석기법에 대해 다양한 연구를 수행하였다. 손현우[5]나 김정석[6] 등은 복합재료로 구성된 다판 브레이크 시스템에 대한 열탄성 해석을 수행하여 그 거동을 연구하였다. 앞의 Zagrodzki나 손현우 등은 열탄성 해석프로그램을 개발하여 연구를 수행하였으나, Gonska[2] 등은 ABAQUS와 같은 상용유한요소프로그램을 사용하여 금속재 브레이크 시스템에 대한 열탄성 해석을 수행하였다. Hohnmann[8] 등은 ADINA를 사용해서 브레이크 드럼과 디스크사이의 접촉문제를 고려한 응력해석을 수행하였다. Joachim[7] 등은 접촉문제에서 물성의 변화에 따른 거동변화를 관찰하였고, Masashi[9] 등은 제동중 발생한 열로 인한 브레이크 드럼의 열변형과 열응력에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 디스크 시스템과 기계적 물성측정

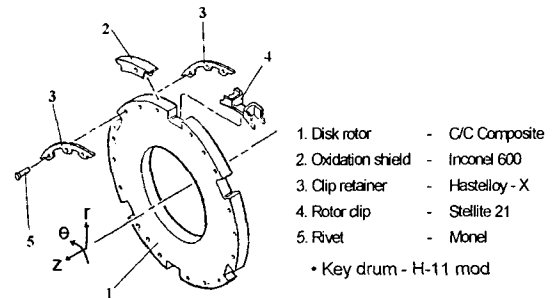


Fig. 1 Composition of rotor brake disk.

브레이크 디스크의 회전판을 구성하고 있는 부품들은 Fig. 1과 같다. 그 구성품들을 살펴보면 첫째, 탄소/탄소 복합재료로 이루어진 디스크의 회전판이 존재한다. 이는 정지판과의 마찰에 의해 시스템을 정지시키는 주요 구성품이다. 둘째, 고온에서 회전판의 산화를 방지하기 위한 옥시데이션 쉴드(*oxidation shield*)가 회전판의 가장자리를 덮게 된다. 셋째, 로터 클립을 키 홀에 고정시키는 역할을 하는 클립 리테이너(*clip retainer*)가 부착된다. 넷째, 키 드럼과 회전판과의 직접적인 접촉을 방지하고, 키 드럼에 걸리는 하중을 접촉하중으로 회전판에 전달해 주는 역할을 하는 로터 클립이 키 홀에 들어가게 된다. 다섯째, 클립 리테이너와 옥시데이션 쉴드를 회전판에 부착시키는 역할을 하는

리벳이 부착되고, 마지막으로 키 홈에서 제동을 걸어줄 키 드럼이 들어가게 된다.

탄소/탄소 복합재료를 제외한 부품들은 고온에서 우수한 성질을 가지는 초합금 계열의 물질들로 그 기계적 물성들이 조사되어 있다[10]. 그러나 탄소/탄소 복합재료의 기계적 물성에 대한 데이터는 존재하지 않으므로 실험을 통하여 이를 측정하였다.

터블 구하는 것이 바람직하다. 그러나 실험에 의한 데이터의 취득이 어려우므로 해석적인 방법으로 접근하여 원하는 데이터를 구하는 연구가 많이 수행되어 왔다.[2-6] 본 연구에서는 ABAQUS를 사용하여 해석을 수행하였다.

Table 1 Comparison of mechanical properties with B-32 model

	Symbol	B-32	*B-52	
Stiffness	$E_r = E_s$	59.3 (GPa)	19.2 (GPa)	↓
	$E_z$	3.5 (GPa)	6.2 (GPa)	↑
	$\nu_{xy}$	-	0.33	
	$G_{rs}$	17.4 (GPa)	6.8 (GPa)	↓
	$G_{rz} = E_{rz}$	(GPa)	3.9 (GPa)	
Strength	$X_T = Y_T$	103.1 (MPa)	69.1 (MPa)	↓
	$Z_T$	3.0 (MPa)	-	
	$X_C = Y_C$	90.1 (MPa)	132.6 (MPa)	↑
	$Z_C$	118.0 (MPa)	126.6 (MPa)	↑
	$S_{rs}$	53.7 (MPa)	70.2 (MPa)	↑
	$S_{rz} = S_{rz}$	5.71 (MPa)	35.1 (MPa)	↑

\* : Present model

현재 모델의 탄소/탄소 복합재료는 직조형식으로 구성된 섬유를 적층면 방향으로 준등방성적인 성질을 가지도록 적층하고, 섬유들을 펀칭(punching)하여 회전판의 두께방향으로 섬유를 밀어 넣었다. Table. 1은 현재 시스템과 이전 시스템에 사용된 재료의 기계적 물성에 대한 비교를 하였다. 마지막 화살표로 이전 물성에 대한 현재 물성의 경향을 관찰할 수 있으며, 전반적으로 이전 재료에 비하여 적층면(r-θ plane) 방향으로는 물성이 저하되고, 두께방향(z-dir)으로는 증가된 경향을 관찰할 수 있었다. 이는 섬유를 펀칭하여 적층면 방향으로는 섬유가 단절되고, 두께방향으로는 섬유가 보강되어 발생한 현상이다. 그러나 적층면 방향의 압축강도는 오히려 증가함을 관찰할 수 있었다.

### 3. 브레이크 시스템의 열탄성 해석

디스크의 3차원 응력해석을 수행하기 위해서는 제동중 디스크에 부과되는 여러 하중에 대한 데이터가 있어야 한다. 이러한 데이터의 측정이 가능하다면 실험을 통해 데이

### 3.1 열탄성 해석모델 및 경계조건

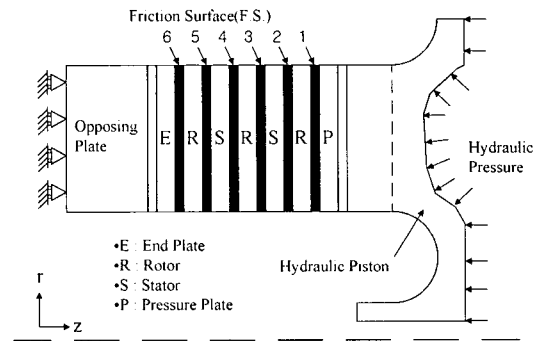


Fig. 2 Schematic of the cross section of an aircraft brake system.

브레이크 시스템의 단면 개략도는 Fig. 2에 나타내었다. 압력판에서 가해지는 유압에 의해 압력판, 정지판, 회전판과 끝판 사이에 마찰이 발생하여 전체 시스템이 정지하는 제동 메커니즘을 가지고 있다.

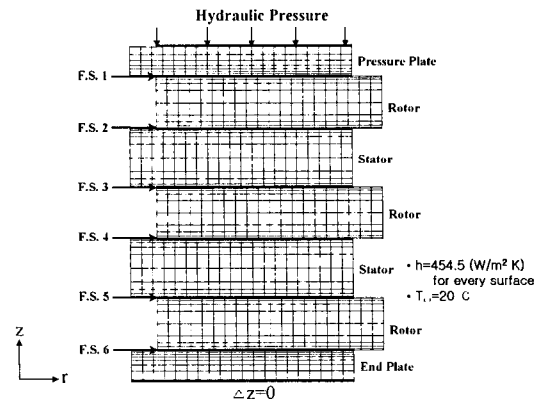


Fig. 3 Analysis model and boundary conditions for the thermo-elastic analysis.

Fig. 3에는 확대칭으로 구성된 해석모델과 경계조건을 나타내었다. 마찰면의 정의와 좌표계 구성은 Fig. 2와 동일하다. 열경계조건은 순현우[5]의 결과에서 참조하여 상온에

서 유동에 의한 대류를 고려하였다. 해석에 사용된 디스크의 물리적 물성들은 Table 2에 나타내었다. 해석 입력으로 부과되는 제동중의 유압이력은 Fig. 4와 같고, 디스크의 각속도 이력은 Fig. 5와 같이 선형으로 가정하여 사용하였다.

Table 2 Physical properties of C/C B/D

Density(kg/m <sup>3</sup> )	1780	
Coefficient of expansion ( $\epsilon/\epsilon K$ )	In-plane	1.15*10 <sup>-6</sup>
	Out of plane	1.63*10 <sup>-6</sup>
Thermal conductivity(W/mK)	In-plane	31.8
	Out of plane	25.9
Coefficient of friction	Normal condition	0.2
	Overload condition	0.16

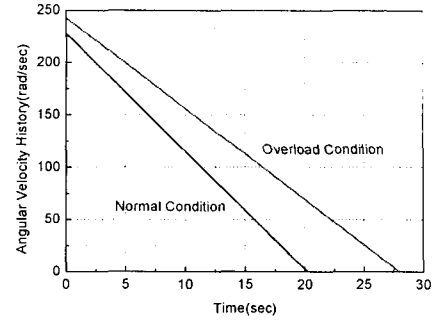
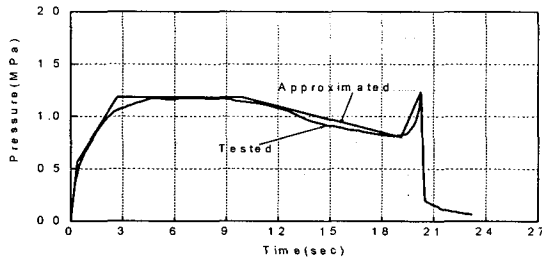


Fig. 5 Angular velocity input.

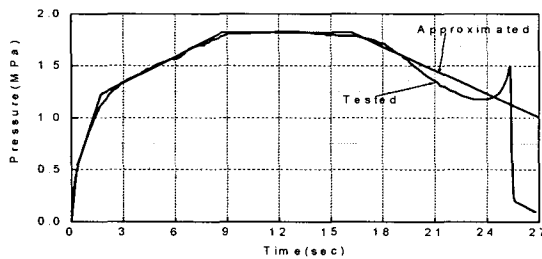
3.2 열탄성 해석결과

3.2.1 온도 분포 결과

시스템에서 발생한 최고온도 이력은 Fig. 6에 나타내었다. 정상상태에서는 12초, 5번 마찰면에서 844°C의 온도가 나타났고, 과부하 하중상태에서는 17.5초, 5번 마찰면에서 1306°C가 나타났다.



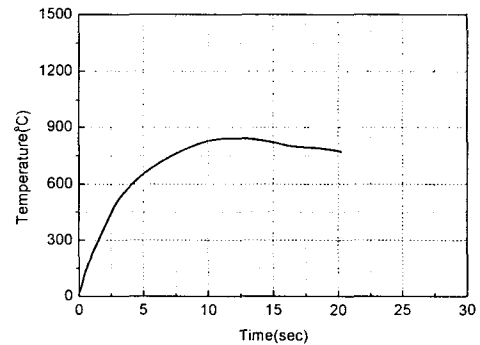
(a) Normal condition.



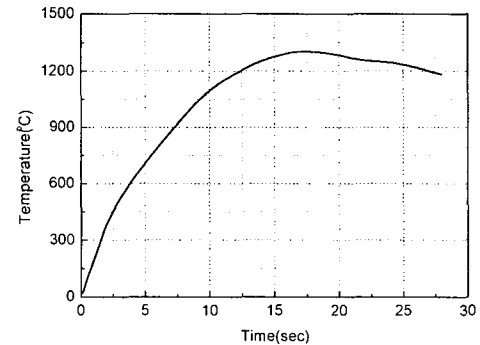
(b) Overload condition.

Fig. 4 Hydraulic pressure history.

Fig. 7과 Fig. 8에는 정상상태와 과부하 하중상태에서 최고온도가 발생한 시점의 온도분포를 나타내었다. 온도분포를 살펴보면 반경방향 바깥쪽에서 더 높은 온도가 발생하는 경향이 나타난다. 반경방향 바깥쪽에서는 안쪽에 비하여 상대적으로 큰 반경으로 인한 높은 마찰일이 발생하고 이로 인한 높은 온도가 발생하였다. 반경방향으로 과부하 하중상태는 정상상태에 비하여 상대적으로 큰 온도차를 나타내었다.

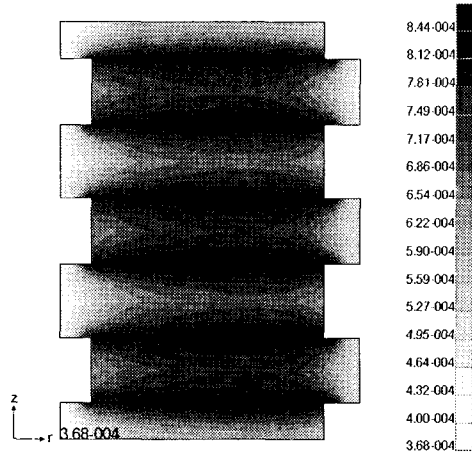


(a) Normal condition

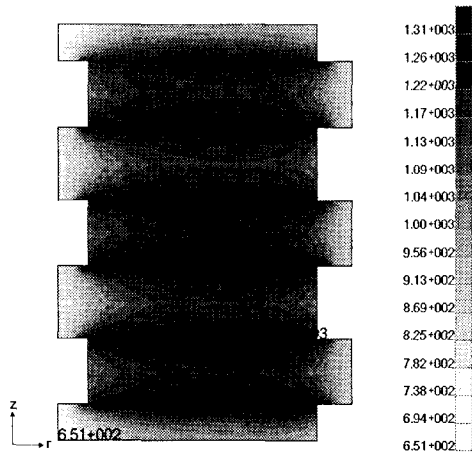


(b) Overload condition

Fig. 6 Maximum temperature history.

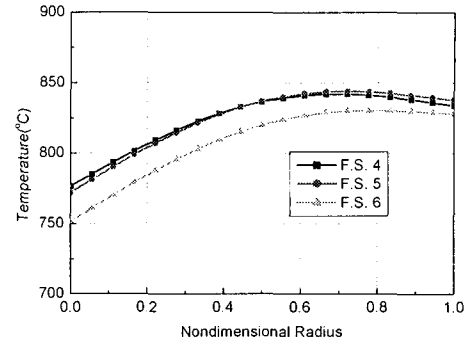
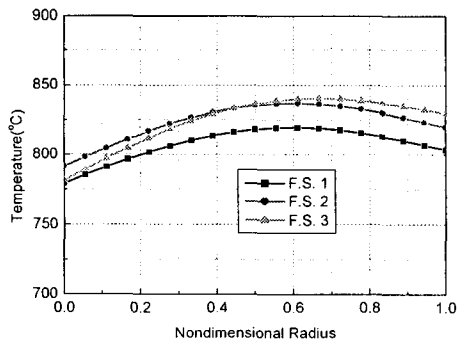


(a) Normal condition(℃).

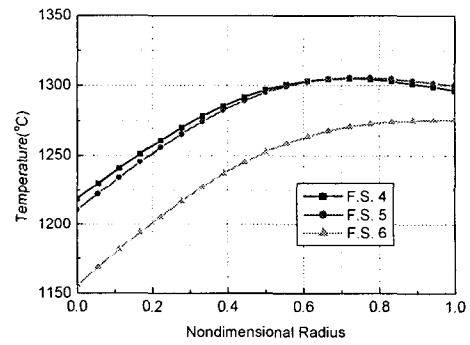
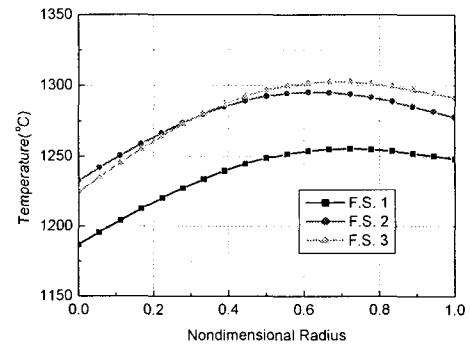


(b) Overload condition(℃).

Fig. 7 Temperature distribution of the brake system.

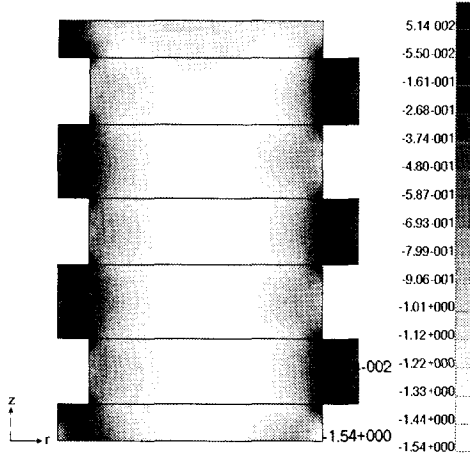


(a) Normal condition.

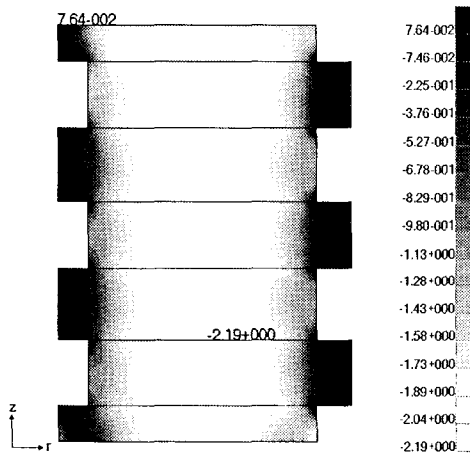


(b) Overload condition.

Fig. 8 Temperature distribution along friction surfaces at maximum temperature.

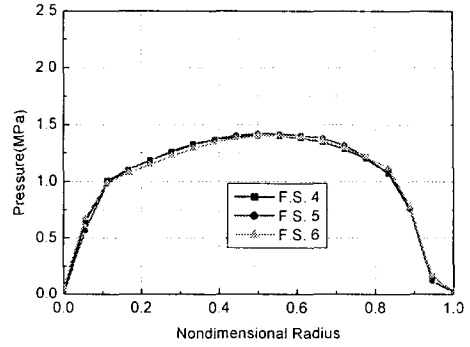


(a) Normal condition(MPa)

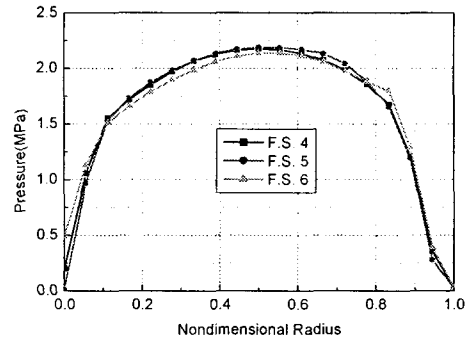
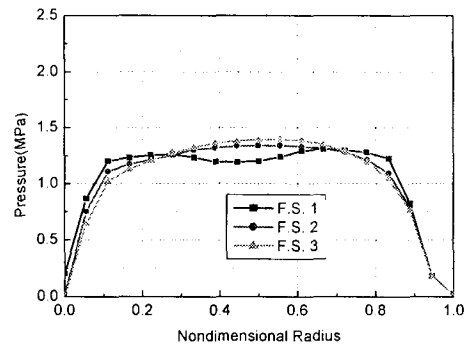


(b) Overload condition(MPa)

Fig. 9 Out of plane stress distribution of the brake system.

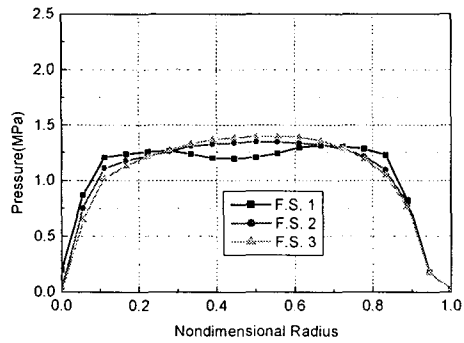


(a) Normal condition.



(b) Overload condition.

Fig. 10 Pressure distribution along friction surfaces at maximum temperature.



3.2.2 압력 분포 결과

제동과정중 시간에 따라 디스크 사이의 접촉상태는 변할수 있으며 이는 각 마찰면에 발생하는 압력분포에 큰 영향을 미치게 된다. Fig. 9와 Fig. 10에는 최고 온도가 발생한 시점에서 각 마찰면에 발생하는 압력분포를 나타내었다. 정상상태와 과부하 하중상태 모두 비슷한 경향을 나타내고 있다. 정상상태는 1.4 MPa, 과부하 하중상태는 2.2 MPa정도의 최대압력이 발생하였다.

### 4. 로터 디스크 하중전달 메커니즘 검증

Fig. 11은 로터 디스크의 하중전달 메커니즘을 나타내고 있다. 제동이 되어 마찰력이 발생하면 회전판과 같이 회전 하던 키 드럼이 회전판의 키 홈 부분에 접촉하게 된다. 이때 키 드럼은 로터 클립을 밀게 되고, 로터 클립은 회전판과의 간격만큼 이동을 한 뒤 회전판에 부착되어 키 드럼으로부터의 하중을 회전판에 전달하게 된다. 로터 클립을 통해 전달되는 하중에 의해 회전판은 변형을 하게 되고, 이로 인해 로터 클립이 클립 리테이너를 밀게 되면 클립 리테이너는 리벳을 밀게 된다. 이와 동시에 리벳은 회전판의 핀 홀사이의 간격만큼 이동한 뒤 회전판의 핀 홀에 부착되고, 리벳과 회전판의 2차 접촉이 발생하게 되어 클립에 걸리는 하중을 핀이 분산시켜 받게 될 것이다. 그러나 만약 로터 클립과 리테이너가 서로 접촉하지 않는다면 키 홈의 하중이 핀 홀로 분산되지 않는다. 즉 로터 클립과 리테이너 사이의 접촉여부는 시스템의 하중을 전달하는 메커니즘에 있어 아주 중요하게 작용하므로 이를 먼저 검증해야 한다.

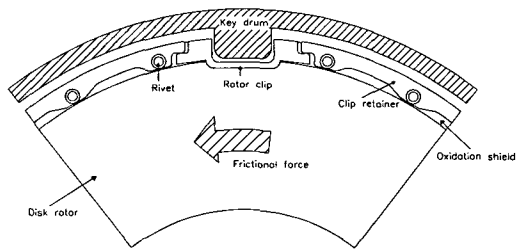
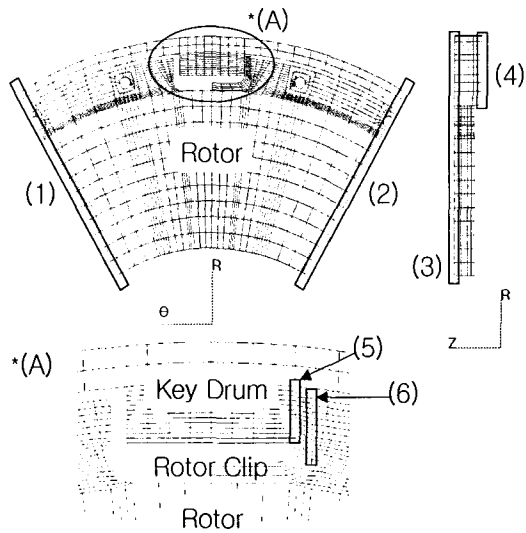


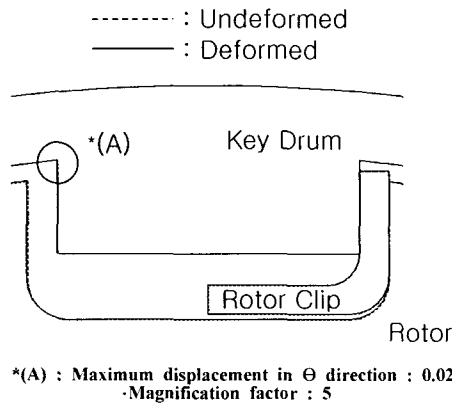
Fig. 11 Loading mechanism of rotor disk.

로터 클립과 리테이너 사이의 접촉여부는 제동중 시스템에 발생하는 변형에 의해 좌우된다. 시스템에는 압력과 마찰력등의 기계적 하중이 작용하고, 이로 인한 높은 온도 변화가 발생한다. 이러한 여러 하중에 의한 변형은 동시에 고려되어야 하지만, 선형해석을 수행하면 전체 시스템의 변형은 키 홈부분의 기계적 변형과 열변형으로 분리하여 해석할 수 있다. 기계적 변형을 해석하기 위한 모델과 경계조건은 Fig. 12와 같고, 변형형상은 Fig. 13과 같다.



- (1) & (2) : Cyclic symmetry condition.
- (3) :  $\Delta z = 0$ .
- (4) :  $\Delta \theta = 0$ .
- (5) : Contact surface between key drum and rotor clip.
- (6) : Contact surface between rotor clip and rotor.

Fig. 12 Analysis model and boundary conditions for the 3-dimensional stress analysis.



\*(A) : Maximum displacement in  $\theta$  direction : 0.026  
 ·Magnification factor : 5

Fig. 13 Mechanical load deformation shape at the key hole.

온도변화에 의한 열 변형을 해석하기 위한 모델과 경계 조건은 Fig. 14과 같고, 변형형상은 Fig. 15과 같다.

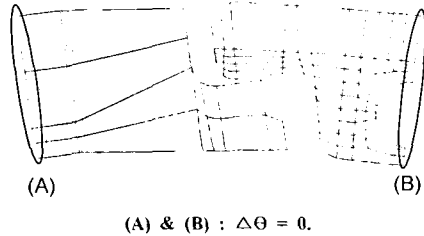


Fig. 14 Analysis model and boundary conditions for the thermal deformation analysis.

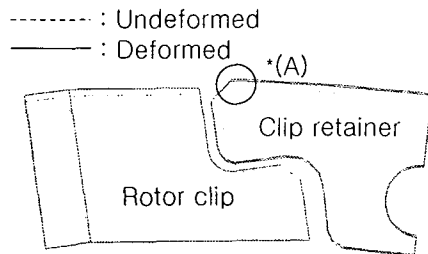


Fig. 15 Thermal load deformation shape of the rotor clip and clip retainer.

회전판의 온도변화에 의한 변형은 로터 클립과 리테이너 사이의 간격을 벌이는 효과만 발생하므로 해석모델에서 회전판은 제외하였다. 금속부품의 온도차는 600°C이다. 열 변형이 기계적 변형에 비해서는 큰 변형이 발생하지만 여전히 두 부품의 간격에 비해 작은 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 이는 기계적 변형에 연관된 디스크의 구조적 강성보다 열변형에 연관된 금속재의 열팽창 계수가 상대적으로 매우 크고, 제동 중 발생하는 온도차가 기계적 하중에 비하여 지배적으로 작용하고 있다는 것을 의미한다. 전체 변형인 기계적 변형과 열 변형을 같이 고려하더라도 로터 클립과 리테이너는 접촉하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 리테이너와 리벳은 로터 클립을 키 홀에 고정시키는 역할만을 하고 하중을 분산하는 역할은 하지 않음을 알 수 있었다. 그리고 리테이너와 리벳은 회전판의 전체 응력분포에 큰 영향을 미치지 못하므로 해석에서 제외시켰다.

#### 4. 회전판의 3차원 응력해석

로터 클립과 리테이너는 제동중 서로 접촉하지 않으므로 이 둘을 제외한 Fig. 12과 같은 모델을 사용하여 해석을

수행하였다. Fig. 12의 모델에 열탄성 해석에서 발생한 압력과 온도분포를 부과하여 응력분포를 관찰하였다.

#### 4.1 안정성 판단방법

회전판의 응력분포를 판단하는 기준은 Von-Mises 방법을 사용하였다. 이는 일반적으로 복합재료에서는 사용되지 않는 방법이다. 그러나 재료의 특성상 적층면 방향으로의 등방성적 성질을 가지므로 전체적인 응력분포를 관찰하는데는 적합한 방법이라 할 수 있다. 그리고 파손판단은 복합재료에 많이 사용되는 파손판단 기준인 Tsai-Wu 파손판단식을 사용하였다. Tsai-Wu 식은 평면응력상태의 식을 사용하였다. 평면응력상태의 식은 두께방향으로 발생하는 응력성분이 두께방향 파손강도에 비하여 아주 작으면 사용가능하다. 사용가능여부는 후에 검증하였다.

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (1)$$

(1)식은 평면응력상태의 Tsai-Wu 식을 나타낸 것이다. 식에서  $F_{12}$ 를 제외한 다른  $F$ 항들은 각 방향의 파손강도들로부터 계산이 되며, 파손강도에 대한 자료는 Table 1.을 사용하였다. 그리고  $F_{12}$ 는 이축실험을 수행하여 측정하나 실험의 수행이 어렵다. 실험적인 자료가 없을 때에는  $F_{12}$ 를 (2)식과 같이 가정하여 사용가능하며, 본 연구도 (2)식의  $F_{12}$ 를 사용하였다[11].

$$F_{12} = -\frac{1}{2} (F_{11} F_{22})^{1/2} \quad (2)$$

#### 4.2 응력 해석결과

Fig. 16에는 정상상태에서의 Von-Mises 응력분포를 나타내었다. 키 홀에서 응력집중현상이 나타났으며, 응력의 최대값은 48.2 MPa이고, 파손지수는 0.617정도였다. 디스크는 면내 준 등방성 성질을 지니므로 Tsai-Wu 지수 계산시 사용되는 응력의 방향이 정확지 않다. 따라서 응력의 회전 에 따른 파손지수를 계산하여 최대값을 표시하였다. Fig. 17에는 응력변화에 따른 파손지수의 변화를 나타내고 있다. 90°를 기준으로 동일한 경향이 반복되며, 응력변환을 고려하지 않은 원주좌표계에서의 값은 0.585정도이다. 응력변환을 고려하면 기준 값보다 5%정도의 파손지수 상승효과가 나타났다.



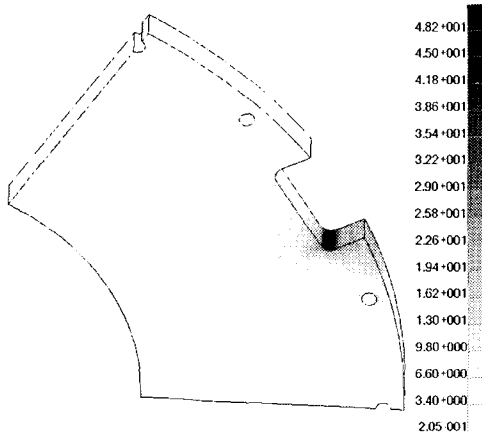


Fig. 16 Von-Mises stress distribution at the normal condition.

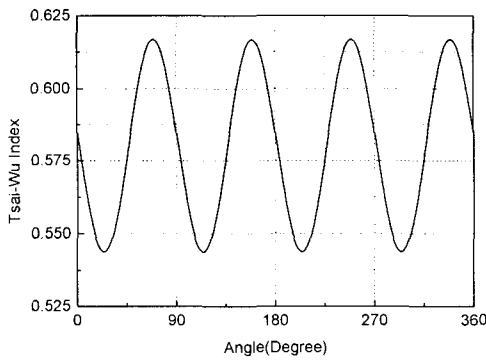


Fig. 17 Failure index variation as stress transform.

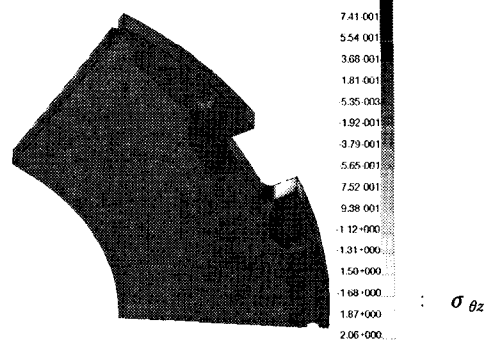
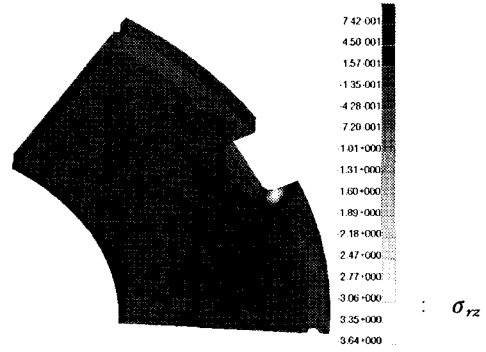
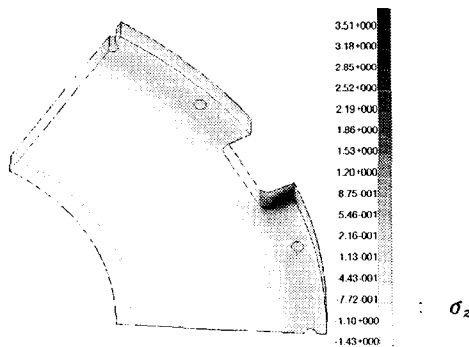


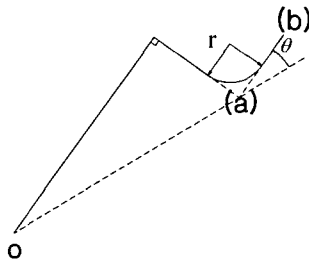
Fig. 18 Stress distribution in thickness direction.

Fig. 18은 두께 방향에 관련된 응력성분을 나타내었다. 두께방향으로는 4 MPa 미만의 응력이 발생하였고, 이는 파손응력의 10%미만의 응력들이다. 이러한 응력성분들은 Tsai-Wu지수에 거의 영향을 미치지 못한다. 따라서 평면응력상태의 Tsai-Wu지수를 사용하여도 3-D Tsai-Wu식의 파손지수와 유사한 결과를 얻을 수 있다.

### 5. 인자연구에 따른 회전판의 응력분포

파손에 안정적인 디스크의 형상을 알아보기 위하여 응력분포에 중요한 영향을 미칠 수 있는 몇 가지 인자를 설정하여 해석을 수행하였다. 회전판의 키 홈 부분이 파손에 가장 취약하므로 키 홈 부분의 형상을 변화시켜가며, 응력분포를 관찰하였다. 변화인자는 접촉면의 각도와 키 홈부분의 곡률반경을 선택하였다. 이 두 인자는 키 홈부분에 작용하는 하중의 단면적과 방향에 영향을 미치는 인자이므로 응력분포에 중요한 영향을 미친다. Fig. 19에는 인자로

설정된 키 홀에서의 접촉면의 회전각도와 곡률반경에 대한 정의를 나타내고 있다.



- O : Center of the rotor.
- $\theta$  : Rotation angle of the contact surface.  
(+ : counterclockwise)
- r : Radius of the curvature.

Fig. 19 Definition of the rotation angle for the contact surface and radius of curvature at the key hole.

### 5.1 접촉면의 각도변화에 따른 변화

접촉면의 각도변화는  $-20^\circ$ 에서  $+10^\circ$ 까지의 각도변화를 고려하였다. 해석각은  $-20, -16, -13, -10, -6, -3, 0, +3, +6.6, +10$ 의 총 10가지 경우에 대한 해석을 수행하였고, 기준모델의 회전각은  $+6.6^\circ$ 이다. Fig. 20과 21에는 키 홀의 접촉면의 각도변화에 따른 키 홀 부근의 최대응력과 최대파손지수의 변화를 나타내었다. 결과를 살펴보면 최대응력과 최대파손지수의 경향이 서로 조금 다른 것을 알 수 있다. 파손지수는 회전각이 작아지면 파손지수 또한 감소하지만, 발생응력은 감소하다가 다시 증가하는 경향이 나타났다. 이와 같은 경향은 회전각이 어느 정도 이상 작아지면 최대 발생응력위치가 Fig. 19의 (a)에서 (b)로 변화하여 발생하는 현상이었다. 그러나 최대 파손지수는 모든 경우에 대하여 Fig. 19의 (a)위치에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 동일한 해석에 대해서도 파손을 접근하는 관점에 따라서는 서로 다른 결과를 나타낼 수 있음을 보여주는 것이다. 준등방적 성질을 띄는 면내특성을 고려하여 Von-Mises응력으로 해석결과를 보면 (-)로 큰 회전각이 형성된 모델에 대하여 큰 응력결과를 나타내지만, 이를 응력성분별로 분리하여 파손강도를 고려한 Tsai-Wu파손지수로 관찰하면 다른 경향을 나타낼수도 있는 것이다. 응력의 회전에 따른 변화는 회전시키지 않은 결과에 대해 약간 높은 값을 지니면서 유사한 경향을 나타내었다.

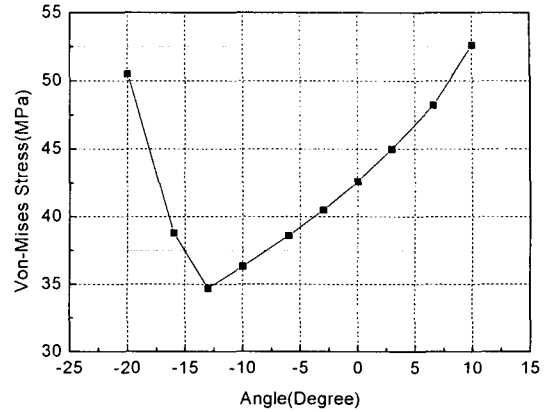


Fig. 20 Maximum Von-Mises stress as rotation angle variation of contact surface at the key hole.

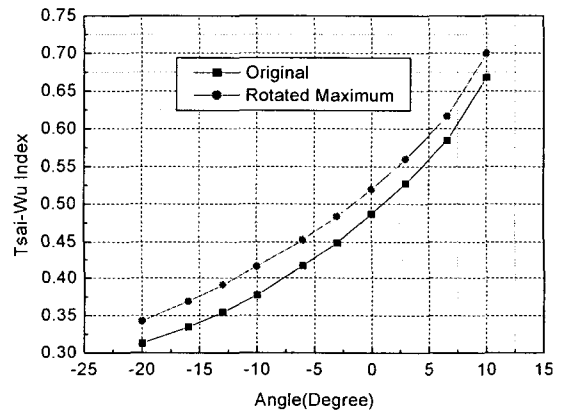


Fig. 21 Maximum Tsai-Wu failure index as rotation angle variation of contact surface at the key hole.

### 5.2 키 홀의 곡률반경변화에 따른 변화

키 홀의 곡률반경은 2 mm에서 4.26 mm까지의 변화를 고려하였다. 곡률반경은 2, 2.3, 2.6, 3, 3.3, 3.76, 4, 4.26의 총 8가지 경우에 대한 해석을 수행하였고, 기준모델의 곡률반경은 3.76 mm이다. Fig. 22과 Fig. 23에는 키 홀의 곡률반경변화에 따른 키 홀 부근의 최대응력과 최대파손지수의 변화를 나타내었다. 응력과 파손지수는 곡률반경이 커짐에 따라 모두 감소하였으며, 응력의 회전에 따른 최대 파손지수의 경향 또한 회전시키지 않은 결과에 대해 약간 높은 값을 지니면서 유사한 경향을 나타내었다.

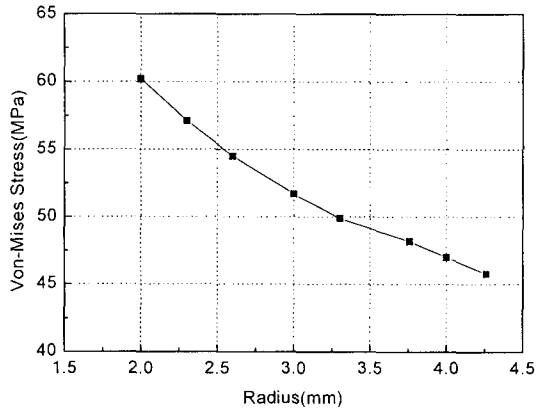


Fig. 22 Maximum Von-Mises stress as the radius of curvature variation at the key hole.

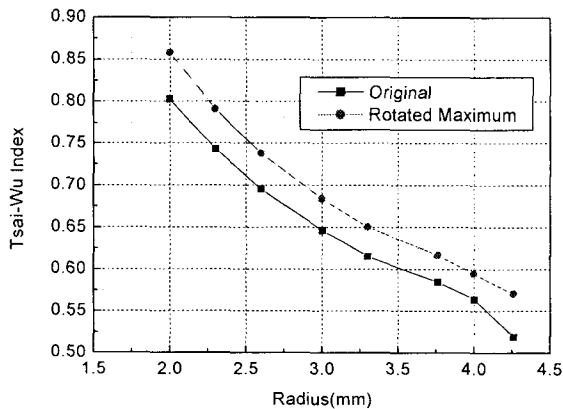


Fig. 23 Maximum Tsai-Wu failure index as the radius of curvature variation at the key hole.

결 론

본 연구는 현재 개발중인 탄소/탄소 브레이크 디스크에 대해 파손에 안정적인 형상을 제안 하는 것이 목적이다. 이를 위해 제동중 발생하는 응력분포를 파악하였고, 이를 바탕으로 파손에 안정적인 회전판의 형상에 대한 연구를 수행하였다.

1) 탄소/탄소 복합재료의 기계적 물성치를 조사하여 이전 모델에 비하여 전반적으로 적층면방향으로는 물성이 저하되고, 두께방향으로는 물성이 강화되었음을 관찰하였다

2) 하중전달 메커니즘에 중요한 영향을 미치는 로터클립과 리테이너의 접촉여부를 조사함으로써 전체하중이 키 홀

부분에서 중점적으로 지지되는 현상을 관찰하였다.

3) Tsai-Wu파손식의 적용시 응력의 1방향을 설정하기 곤란한 경우에 대하여 응력성분의 회전애 따른 파손지수경향을 관찰하여 그 최대값을 적용하였다

4) 키 홀 부분 접촉면의 각도를 변화시켜 가며 안정성을 평가하였다. 접촉면의 각도는 회전각이 증가할수록 파손지수가 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 (-)방향으로 일정이상 접촉면 각도가 감소하면 최대 Von-Mises응력의 발생위치가 변화하여, 파손지수의 경향과 조금 다른 결과를 나타냄을 알 수 있었다. 동일한 해석에 대해서도 접근방법에 따라 서로 다른 경향을 나타낼수도 있음을 알 수 있었다.

5) 키 홀부분의 곡률반경을 변화시켜 가며 응력분포의 경향을 파악하였다. 곡률반경은 증가할수록 발생응력과 파손지수 모두 감소하는 경향을 관찰할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국항공우주산업 주식회사(KAI)가 지원한 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대하여 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 유재석, 김정석, 김천곤, 홍창선, 김광수, 윤병일, "탄소/탄소 브레이크 디스크의 기계적 특성에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 제11권, 제3호, 1998, pp. 59-73.
- 2) Gonska, H. W., Kolbinger, H. J., "ABAQUS Application Example: Temperature and Deformation Calculation of Passenger Car Brake Disks," ABAQUS Users Conference Proceedings, 1993.
- 3) Zagrodzki, P., "Numerical Analysis of Temperature Fields and Thermal Stresses in the Friction Discs of a Multidisc Wet Clutch," Wear, Vol. 101, 1985, pp. 255-271.
- 4) Zagrodzki, P., "Analysis of Thermomechanical Phenomena in Multidisc Clutches and Brakes," Wear, Vol. 140, 1990, pp. 291-308.
- 5) 손현우, 홍창선, 김천곤, 성대운, 윤병일, "탄소/탄소 복합재 브레이크 디스크의 열탄성 연구," 한국복합재료학회지, 제 8권, 제 1호, 1995, pp. 43-57.
- 6) 김정석, 유재석, 김진봉, 김천곤, 홍창선, 윤병일, "탄소-탄소 복합재 브레이크 시스템의 2차원 과도기 열탄성

- 해석,” 한국항공우주학회지, 제26권, 제 6호, 1998, pp. 64-70.
- 7) Joachim. A. D., Barber. J. R., “Effect of Material Properties in Certain Thermoelastic Contact Problems.” *Journal of Applied Mechanics*, Vol 65, 1998, pp. 889-893.
  - 8) C.Hohnmann, K. Schiffner, K. Oerter, H. Reese, “Contact Analysis for Drum Brakes and Disk Brakes using ADINA,” *Computers and Structures*, Vol. 72, 1999, pp. 185-198.
  - 9) Masashi Daimaruya, Hidetoshi Kobayashi, Khairul Fuad, “Thermoelasto-Plastic Stresses and Thermal Distortions in a Brake Drum,” *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 20, 1997, pp. 345-361.
  - 10) *Mechanical Properties Data Center, Aerospace structural metals handbook*. Mechanical Properties Data Center, Battelle Columbus Laboratories, 1980.
  - 11) Isaac M. Daniel, Ori Ishai, “Engineering Mechanics of composite materials,” Oxford, New- York, Toronto 1994.