

탄소/탄소 브레이크 디스크의 과도기 열탄성 해석과 3차원 응력해석

오세희*, 유재석*, 김천곤**, 홍창선**, 김광수***

Transient Thermoelastic Analysis and 3 Dimensional Stress Analysis of Carbon/Carbon Brake Disks

S. H. Oh*, J. S. Yoo*, C. G. Kim**, C. S. Hong**, K. S. Kim***

KEY WORDS : Carbon/carbon, Brake disk, Thermoelastic, Contact, FEM

ABSTRACT

This paper presents the thermoelastic analysis and 3-D failure analysis of the carbon/carbon brake disk. 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 thermoelastic analysis and 3-D stress analysis for the brake disk. The gap between rotor clip and clip retainer was an important parameter in the loading transfer mechanism of the rotor. The change of gap was considered separating the mechanical deformation and thermal deformation. Because the rotor clip and clip retainers were not contacted, the clip retainers and rivets were excluded from the rotor analysis model. The disk was modeled by using the cyclic symmetry condition and the contact problem between the rotor disk and rotor clip was considered. From the results of the 3-D stress analysis, the stress concentration at the key hole of the brake disk was confirmed.

1. 서론

탄소/탄소 복합재료는 고온에서 비강성과 비강도가 우수하고 적당한 마찰계수의 특성을 가지고 있어 항공기용 브레이크 디스크에 많이 사용되고 있다. 항공기용 브레이크 시스템은 착륙 시 활주 중인 항공기의 운동에너지를 마찰에너지와 마찰에 의한 열에너지로 변환하여 항공기를 정지시키는 장치이다.

브레이크 시스템은 압력판, 회전판, 정지판, 끝판으로 구성되어 있다. 항공기를 일정하게 감속시키기 위해서는 바퀴축에 일정한 토크가 유지되어야 하며 이를 위하여 압력판에는 시간에 따라 다른 유압이 걸리게 된다. 이 압력에 의해 디스크의

회전판과 정지판 사이에는 마찰력이 발생하고, 그로 인해 마찰열이 발생하게 된다. 마찰열에 의해 디스크에는 기계적 하중과 함께 열하중이 발생한다. 이러한 하중에 대하여 고도의 안정성을 요구하는 항공기의 브레이크 디스크 시스템을 개발하는 과정에서 디스크의 파손해석은 필수적인 과정이다.

현재 개발 중인 모델은 회전판에 부착되는 금속 부품들이 하중전달에 아주 중요한 역할을 하므로 이들을 해석에 고려해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 회전판의 하중전달에 중요한 영향을 미치는 금속부품들의 접촉문제들을 고려하여 해석을 수행하였다.

회전판의 응력해석과 설계를 하기 위해서는 우선 각 부품들의 기계적 물성치가 필수적이다. 회전판을 제외한 부품들은 초합금계열의 물질들로 구성되어 있어 물성이 측정되어 있지만, 회전판의 물성은 새로 측정되어야 한다. 따라서 파손해석을 위한 입력으로 탄소/탄소 복합재료의 기계적 물성

* 한국과학기술원 항공우주공학과 박사과정

** 정교수, 한국과학기술원 항공우주공학과

*** 한국항공우주산업

치를 측정하였다.

파손해석을 수행하기 위한 입력중의 하나로써 회전판의 마찰면에 작용하는 압력분포와 온도분포에 대한 데이터가 필요하다. 이는 시스템에 대한 과도기 열탄성 해석을 수행하여 발생한 결과를 사용하였다. 그리고 회전판에 부착되는 금속부품들에 대한 온도는 제동 중 발생가능한 온도분포를 가정하여 사용하였다. 이와 같은 조건으로 회전판과 정지판에 대한 3차원 응력해석을 수행하였다.

2. 회전판의 구성품과 기계적 물성치

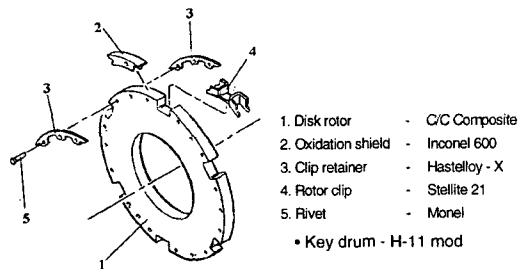


Fig. 1 Composition of the brake disk.

회전판은 Fig. 1 과 같이 회전판과 하중을 전달하는 초합금계열의 금속부품들로 구성되어 있다. 금속부품들은 고온에서 우수한 성질을 가지며 기계적 물성이 조사되어 있다[15]. 그러나 회전판의 재료인 탄소/탄소 복합재료는 측정된 기계적 물성이 존재치 않아 실험을 통하여 이를 측정하였다.

Symbol	B-32	*B-52	
$E_s = E_t$	59.3 (GPa)	19.2 (GPa)	↓
E_c	3.5 (GPa)	6.2 (GPa)	↑
ν_{xy}		0.33	
G_{xy}	17.4 (GPa)	6.8 (GPa)	↓
$G_{xz} = G_{yz}$		3.9 (GPa)	
$X_T = Y_T$	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_{xy}	53.7 (MPa)	70.2 (MPa)	↑
$S_{xz} = S_{yz}$	5.71 (MPa)	35.1 (MPa)	↑

*: 현재 모델

Table 1. Properties comparison with B-32 model.

현 모델은 섬유를 직조형식으로 구성하여 이를 준등방성적인 성질을 가지도록 적층하였다. 그리고 적층된 섬유를 편칭을 하여 두께방향으로 섬유를 밀어넣어 두께방향의 물성을 강화시켰다. 그러나 적층면방향으로는 섬유가 단절되어 전체적으로 거의 물성이 약화된 경향을 알 수 있었다. 적층면 방향의 압축강도는 오히려 강화되었다. Table. 1 은 이전 모델과의 물성을 비교한 것이다.

3. 시스템의 과도기 열탄성 해석

브레이크 디스크에 대한 3차원 응력해석을 위한 하중조건을 입력으로 마찰면에서의 온도분포와 압력분포가 사용된다. 이러한 자료는 동적실험을 수행하여 얻을 수도 있다. 그러나 실험을 통한 측정이 매우 어려우므로 시스템의 제동과정에 대하여 과도기 열탄성 해석을 수행하여 온도분포와 압력분포를 구하였다. 해석 모델과 경계조건은 Fig. 2 와 같다.

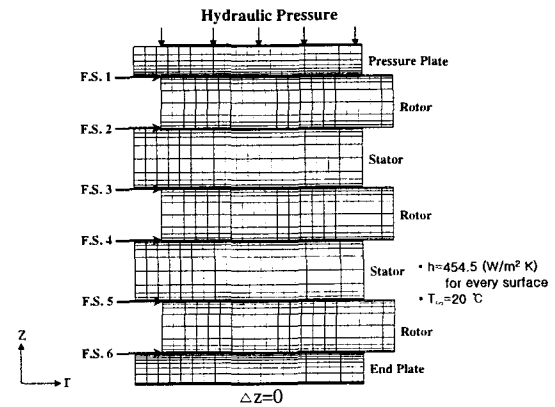


Fig. 2 Thermoelastic analysis model and BC.

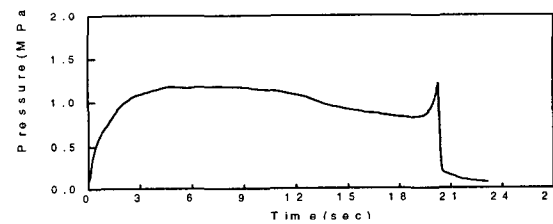


Fig. 3 Hydraulic pressure history at normal condition.

시스템은 2차원 축대칭으로 모델링하였고, 압력판에 가해진 정상상태의 압력이력은 Fig. 3 과 같다. ABAQUS 를 사용하여 해석을 수행하였고, 해석에 사용된 요소는 ABAQUS 에서 제공하는 CAX4T 이다. 정상상태 해석시 최대온도는 제동이

시작된 12초 후에 5번 마찰면에서 844 °C가 발생하였다.

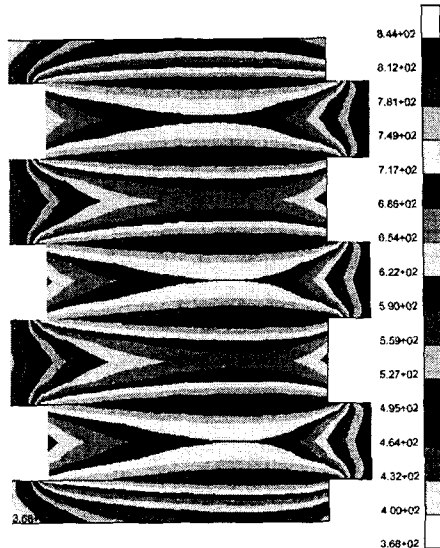


Fig. 4 Temperature distribution at maximum temperature.

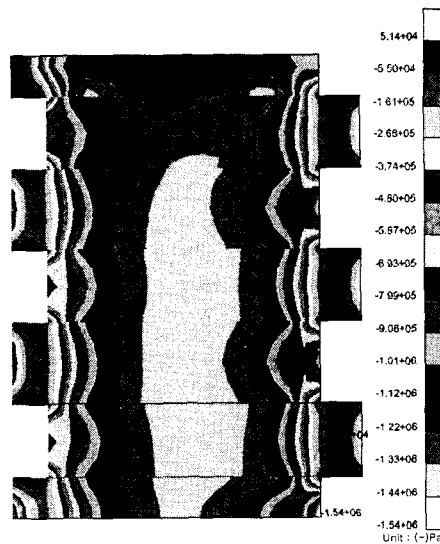


Fig. 5 Out of plane stress distribution at maximum temperature

Fig. 4, 5는 최대온도가 발생한 12초에서 시스템의 온도분포와 두께방향의 응력분포를 나타낸 것이다. Fig. 6, 7은 12초에서 발생한 각 마찰면에서의 온도분포와 압력분포를 나타내었다. 각 면에서 최대온도는 반경이 큰 바깥쪽에서 주로 발생하였고, 각 마찰면에서는 거의 균일한 압력분포가 발생하고, 그 최대값은 1.44 MPa였다.

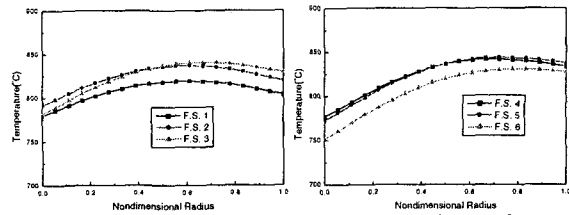


Fig. 6 Temperature distribution along friction surface at maximum temperature (Normal condition).

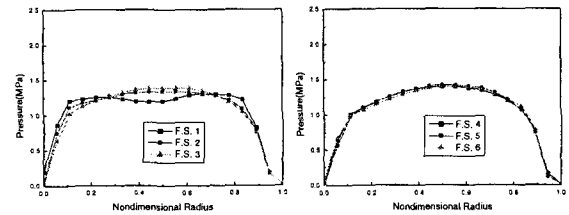


Fig. 7 Pressure distribution along friction surface at maximum temperature (Normal condition).

디스크를 제외한 금속부품들에 대한 온도는 정확히 측정하기가 어렵다. 그러나 동적실험직후의 외관의 온도가 600-700°C 정도이므로 금속부품들의 온도는 600°C의 균일한 분포로 가정하였다.

4. 회전판의 제동 미케니즘 검증

Fig. 8는 회전판의 하중전달 메커니즘을 나타내는 그림이다. 제동이 되면 회전판과 같이 회전하던 키 드럼이 키 홈에 걸리게 되어 하중을 지지한다. 키 드럼에 의해 로터 클립은 회전판에 하중을 전달하게 된다. 만약 이때 발생하는 회전판의 변형으로 인해 회전판과 클립 리테이너가 접촉을 하면 키 홈의 하중이 편홀로 전달이 되지만, 접촉하지 않으면 키 홈에서만 하중이 지지되므로 리테이너와 리벳을 해석모델에서 제외시켜도 큰 무리가 없다. 따라서 클립과 리테이너의 접촉여부를 먼저 조사해야 한다.

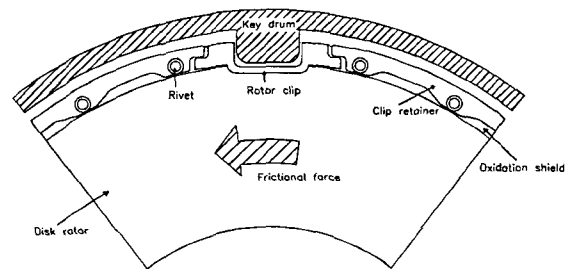


Fig. 8 Loading mechanism.

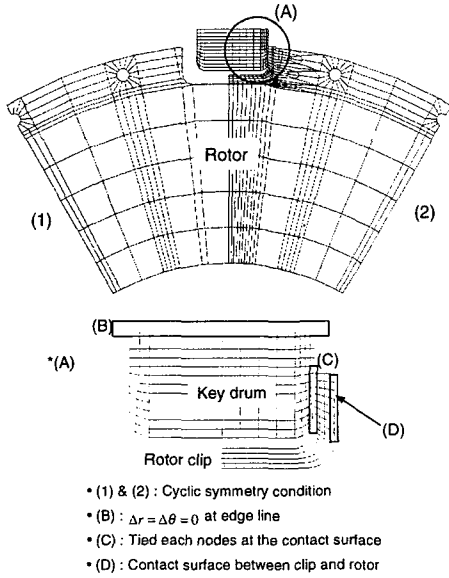


Fig. 9 Analysis model and boundary conditions for the 3-D stress analysis of the C/C B/D.

로터 클립과 리테이너의 접촉여부는 제동시 발생하는 기계적 하중과 온도차에 의한 열 하중에 의한 변형을 확인함으로써 알 수 있었다. Fig. 9는 기계적 변형을 관찰하기 위한 모델로써 원주방향으로 발생한 최대 기계적 변형은 0.031 정도였다.

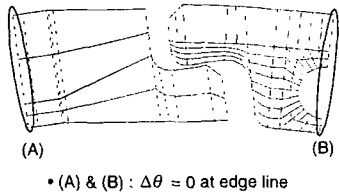


Fig. 10 Analysis model and boundary conditions for the analysis of the thermal deformation.

Fig. 10은 열 변형을 관찰하기 위한 모델로써, 온도차는 600°C의 균일분포를 가하였다. 이 때 발생한 최대 열 변형은 0.145 정도였다. 로터 클립과 리테이너 사이의 간격이 2 정도되는 점을 감안하면 로터 클립과 리테이너는 제동 중 접촉하지 않는다는 사실을 알 수 있었다.

5. 회전판의 응력해석

로터 클립과 리테이너는 서로 접촉하지 않았으므로 이 둘을 제외한 Fig. 9와 같은 모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 전체적인 응력분포관찰은 Von-Mises 방법을 사용하였다. 그리고 최대응력

이 발생하는 지점에 대해서는 평면응력상태의 Tsai-Wu 파손지수를 사용하여 해석하였다. 두께방향으로 발생하는 응력이 파손강도에 대하여 아주 작으면 평면응력상태로 가정할 수 있으므로 평면응력상태의 Tsai-Wu 식의 적용여부는 후에 검증하였다.

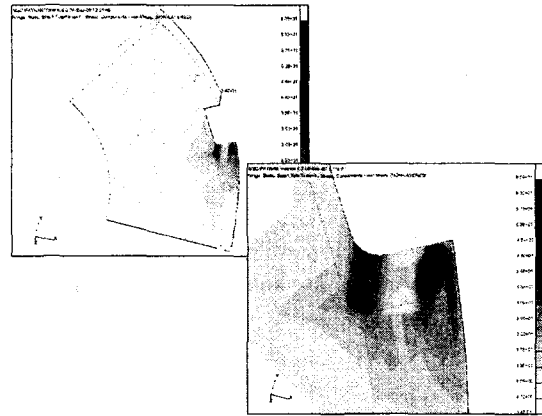


Fig. 11 Stress distribution at the key hole region.

Fig. 11에는 회전판의 응력분포를 나타내었다. 키 홀에서 응력집중현상이 발생하며, 그 최대값은 66MPa 정도이고, Tsai-Wu 지수는 0.246 정도였다. 최대응력은 키 드럼이 지지하는 부분에서 약간 반경방향 바깥쪽부분에서 발생하였다.

Fig. 12은 회전판의 키 홀 부분에서의 변형형상을 나타낸 것이다. 온도 상승에 의해 반경방향 바깥쪽으로 주로 변형이 발생했음을 알 수 있었다. 대부분의 변형이 기계적 하중보다는 온도차에 의한 변형이었으므로 로터 클립과의 슬립현상은 관찰하기 어려웠다.

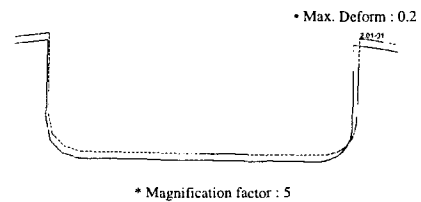


Fig. 12 Deform shape of rotor at key hole.

두께방향으로 발생한 응력들은 1~4 MPa 정도로써 파손응력의 10%미만이었다. 이러한 응력성분은 3차원 Tsai-Wu 식에 거의 영향을 미치지 못한다. 따라서 평면응력상태의 식을 사용해도 3차원 식의 지수와 유사한 결과를 얻을 수 있다.

6. 정지판의 응력해석

정지판은 회전판과 함께 시스템의 하중을 지지하는 부분이므로 이 부분에 대한 응력해석 또한 매우 중요하다. 회전판이 반경방향 바깥쪽에서 키드럼에 의해 하중이 지지되는 것과는 달리 정지판은 반경방향 안쪽에서 정지축에 의해 하중이 지지된다. 따라서 이러한 효과가 정지판의 응력분포에 끼치는 영향을 조사할 필요가 있다.

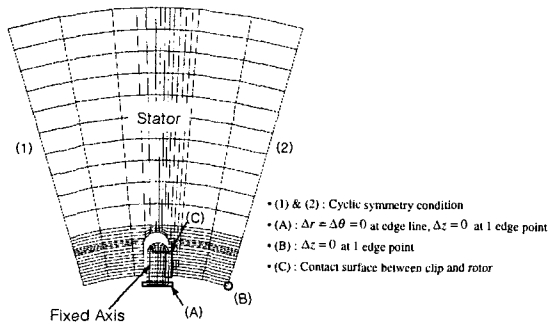


Fig. 13 Analysis model and boundary conditions for the 3-D stress analysis of the stator.

Fig. 13 는 정지판의 응력해석을 수행하기 위한 모델과 경계조건이다. 대부분의 경계조건은 회전판의 응력해석을 수행한 것과 동일하다.

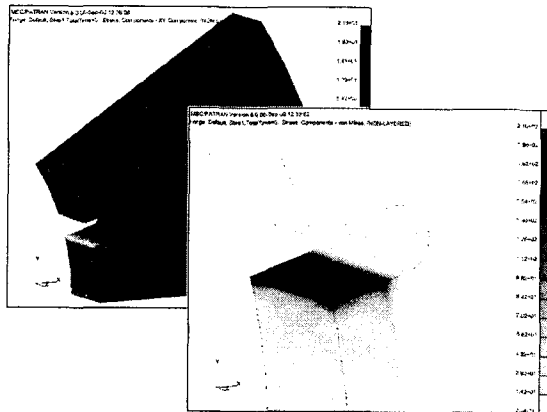


Fig. 14 Von-Mises Stress distribution of stator.

Fig. 14 에는 정지판에 발생하는 응력분포를 나타내었다. 정지판 역시 정지축의 키가 들어가는 키 홀 부분에 응력집중이 발생하며 매우 큰 응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 발생한 최대응력은 210 MPa 정도로 회전판에 발생한 응력의 3 배정도 크기이며, 정지판에 파손을 유발할 수 있는 정도의 응력이다. 이런 파손경향이 어떠한 현상으로

인하여 발생하는지 살펴보았다.

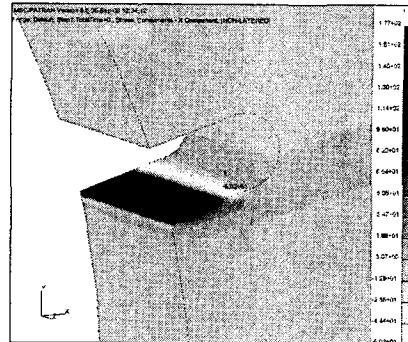


Fig. 15 Stress distribution of stator in radial direction.

Fig. 15 는 정지판에 작용하는 반경방향 응력이다. 그림에서 보면 반경방향의 안쪽의 정지축과 접촉하는 부분에서 매우 높은 (+)의 인장응력이 발생했다. 정지판의 홀 부분은 마찰력과 정지축의 키 부분에 의해 원주방향으로 압축응력이 작용한다. 원주방향의 압축응력에 의해 포아송 효과와, 마찰면을 따라 발생한 열응력 효과로 인하여 반경방향으로 인장응력이 발생할 수 있다. 그러나 이렇게 높은 응력이 발생하는 것은 정지축의 온도차에 의한 변형과 정지판의 온도차에 의한 변형이 서로 달라 발생한 열응력성분이 주가 된 것이다. 정지축의 열팽창 계수는 1.33×10^{-5} 이고, 정지판의 평면방향의 열팽창계수는 1.15×10^{-6} 이다. 그리고 정지축은 600 °C의 온도차를 가하였고, 마찰면의 반경방향 안쪽의 최대온도는 400 °C, 마찰면에 반경방향 바깥쪽은 700 °C정도의 온도차가 발생하였다. 즉 정지축은 전영역이 10^{-3} 정도의 변형률이 유발되고, 정지판은 마찰면의 반경방향 안쪽은 10^{-4} , 마찰면의 반경방향 바깥쪽은 10^{-3} 정도 크기의 변형률이 유발된다. 즉 정지판은 마찰면의 반경방향 안쪽 부분은 바깥쪽부분에 비하여 발생하는 절대적인 변형률은 작지만 정지축과의 상대적인 열변형률의 차이는 마찰면의 반경방향 안쪽부분이 더 크게 된다. 따라서 온도차이에 의해 발생하는 열응력은 정지판의 마찰면의 반경방향 안쪽부분이 바깥쪽부분보다 크게 된다. 이러한 경향은 다른 응력성분에서도 비슷하게 나타났다.

실제 상황에서는 파손에 의해 미소균열이 발생하면 정지축의 키 부분과 정지판의 접촉면에 변화가 발생하여 응력의 재분배가 발생할 것으로 예측된다. 그러나 해석에서와 같은 접촉면의 국부적인 높은 응력은 정지판 전체의 파손을 유발하는 응력이라기 보다는 접촉면에 국부적인 모재파손을 유발시킨다. 이와 같은 국부적인 모재파손이 잦은

반복하중에 의해 시스템에 발생하면 정지판의 전체파손을 유발할 수 있는 원인으로 작용할 것으로 예측된다.

7. 결론

본 연구는 현재 개발중인 탄소/탄소 브레이크 디스크의 파손에 안정적인 형상을 제안하는 것이 최종적인 목적이다. 이를 위하여 제동 중 회전판과 정지판에 발생하는 응력분포를 해석하였고, 이를 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- 1) 탄소/탄소 복합재료의 기계적 물성을 조사하여, 이전 모델에 비하여 전반적으로 적층면방향으로는 물성이 저하되고 두께방향으로는 물성이 강화되었음을 관찰하였다.
- 2) 제동중 디스크 시스템에 대한 열탄성 해석을 수행하여 시스템에 발생하는 온도분포와 마찰면에 발생하는 압력분포를 해석하였다. 정상상태시 최대온도는 12 초에 5 번 마찰면에서 844 °C가 발생하였고, 최대압력은 5 번 마찰면에서 1.44 MPa가 발생하였다.
- 3) 회전판의 하중전달 메커니즘에 중요한 영향을 미치는 로터클립과 리테이너의 접촉여부를 조사함으로써, 회전판의 전체하중이 키홀부분에서만 지지되는 현상을 관찰하였다.
- 4) 회전판에 대한 응력해석을 수행하였다. 회전판은 최대 Tsai-Wu 파손지수가 0.246 정도로 매우 파손에 안정적인 형상임을 알 수 있었다.
- 5) 정지판에 대한 응력해석을 수행하였다. 정지판은 정지축과 정지판의 열팽창 계수차와 온도분포 차이에 의한 효과로 인하여 파손을 유발시킬 수 있는 매우 큰 응력이 발생하였다.

후기

본 연구는 과기부 민군겸용기술과제의 일환으로 한국항공산업주식회사와 공동으로 수행하였습니다.

참고문헌

1. Gonska. H. W., Kolbinger. H. J, "ABAQUS Application Example: Temperature and Deformation Calculation of Passenger Car Brake Disks," *ABAQUS Users Conference Proceedings*, 1993
2. 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.
3. Zagrodzki. P., "Analysis of Thermomechanical Phenomena in Multidisc Clutches and Brakes," *Wear*, Vol. 140, 1990, pp. 291-308.
4. 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.
5. Yi. Y. B., Du. S., Barber. J. R., "Effect of Geometry on Thermoelastic Instability in Disk Brakes and Clutches," *Journal of Tribology*, Vol. 121, 1999, pp. 661-666.
6. Sahin. A. Z., Al-Garni. A. Z., "Transient Temperature Analysis of Airplane Carbon Composite Disk Brakes," *Journal of Thermophysics*, Vol. 12, No. 2, 1997, pp. 283-285.
7. 손현우, 홍창선, 김천곤, 성대운, 윤병일, "탄소/탄소 복합재 브레이크 디스크의 열탄성 연구," *한국복합재료학회지*, 제 8 권, 제 1 호, 1995, pp. 43-57.
8. 김경희, "탄소/탄소 브레이크 디스크의 3 차원 파손 해석," *한국과학기술원, 석사학위논문*, 1995.
9. 김정석, 유재석, 김진봉, 김천곤, 홍창선, 윤병일, "탄소-탄소 복합재 브레이크 시스템의 2 차원 과도기 열탄성 해석," *한국항공우주학회지*, 제 26 권, 제 6 호, 1998, pp. 64-70.
10. 유재석, 김정석, 김천곤, 홍창선, 김광수, 윤병일, "탄소/탄소 브레이크 디스크의 기계적 특성에 관한 연구," *한국복합재료학회지*, 제 11 권, 제 3 호, 1998, pp. 59-73.
11. 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.
12. M. Ciavarella, "Tangential Loading of General Three-Dimensional Contacts," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 65, December, 1998, pp. 998-1003.
13. R.S. Hack, A.A Becker, "Frictional Contact Analysis under Tangential Loading using a Local Axes Boundary Element Formulation," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41, 1999, pp. 419- 436.
14. 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.
15. Mechanical Properties Data Center, "Aerospace structural metals handbook," Mechanical Properties Data Center, Battelle Columbus Laboratories, 1980.