

## 論文

## 탄소/탄소 브레이크 디스크의 기계적 강도 시험에 관한 연구

유재석\* · 오세희\* · 김천곤\*\* · 홍창선\*\* · 윤병일\*\*\* · 김광수+

**Mechanical Strength Experiment of Carbon/Carbon Composite for Aircraft Brake Disk**

J. S. Yoo\*, S. H. Oh\*, C. G. Kim\*\*, C. S. Hong\*\*, B. I. Yoon\*\*\* and K. S. Kim+

**ABSTRACT**

The strength test was done for the Carbon/Carbon rotor disk which is the critical part of a carbon/carbon brake system in an operating time. The loading fixture was designed for the static strength test of a single carbon/carbon brake disk using finite element analysis. To simulate the real dynamic system in a static condition, the friction surface of the rotor disk was fixed and static load was applied to the rotor slot in the circumferential direction. The described failure mechanism of the brake disk can be described as matrix cracking occurred first at the contact surface of the rotor slot, subsequent delamination from the cracked contact surface, and the final fracture at the notch of the rotor.

## 초 록

실제 구동 시 가장 취약한 부분인 탄소/탄소 브레이크 로터 디스크에 대해 강도실험을 수행하였다. 이 실험을 위해 탄소/탄소 브레이크 디스크 정적 강도 실험을 할 수 있는 시험 치구를 상용 유한요소 프로그램인 NISA를 이용하여 설계 제작하였다. 실제 동역학적인 구동 상태를 정역학적으로 묘사하기 위해 브레이크 디스크의 마찰면을 고정시킨 후 실제의 하중방향과 동일한 방향으로 하중을 로터 슬롯에 가하여 브레이크 디스크의 강도를 측정하였다. 또한 파손시 나타나는 파손 메카니즘은 키와 로터슬롯의 접촉부위에서부터 시작되는 모재 파손에 이은 층간 분리가 나타났고, 하중이 더욱 증가하자 로터슬롯의 노치 부분에서 최종파손으로 이어졌다.

Key words : Carbon/Carbon Brake Disk, Carbon/Carbon Strength Test, Delamination

\* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 박사과정

\*\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

\*\*\* 국방과학연구소

+ 한국항공우주산업

## 1. 서 론

탄소재료의 특징은 다른 재료에 비하여 내열성이 뛰어나므로, 비산화성 조건에서 3000℃의 고온영역에서도 기계적 특성의 변화 없이 사용이 가능할 뿐만 아니라 높은 열전도성, 내약품성 및 자기윤활성, 가공이 용이한 점등으로 인하여 매우 광범위한 분야에서 사용되고 있다. 탄소/탄소 복합재는 기존의 많이 이용되어 온 강철(steel)에 비해 브레이크 디스크의 재질로서, 고온에서 우수한 열적, 구조적 안정성과 높은 비강도, 비강성등의 우수한 특성을 가지고 있어 항공기용 브레이크 디스크에 많이 사용된다.

항공기용 브레이크 디스크 시스템은 활주중인 항공기의 운동에너지를 열에너지와 마찰에너지로 변환시켜 항공기를 정지시키는 장치이다[1-8]. 브레이크 디스크의 구성을 보면 Fig. 1에서 보듯이 양쪽 바깥면에 각각 두께 3mm정도가 마찰재인 단섬유층(chopped-mat)으로 구성되며, 이 단섬유층은 브레이크가 정지할 때 마찰면의 열을 빨리 밖으로 방출하는 역할을 한다. 또한 양쪽면을 제외한 중앙부 약 10mm정도는 하중지지부인 직조적층(fabric)으로 브레이크가 작동할 때 하중을 지지하는 부분이다. 항공기용 브레이크 시스템은 Fig. 2에서 보듯이 압력판(pressure plate), 정지판(stator) 2개, 회전판(rotor) 3개와 끝판(end plate) 1개가 접쳐진 다판구조로 구성되어 있다. 항공기를 정지시키기 위해서는 압력판에 압력을 가하여 회전판을 정지시켜야 한다. 이때 회전판과 정지판의 마찰로 인하여 시스템은 정지된다. 여기서의 압력은 정지판 측에 걸리는 토크(torque)를 일정하게 하기 위해 시간에 따라 변하게 된다. 따라서 바퀴드럼과 연결되어 있는 로터 슬롯에 걸리는 반력은 바퀴축의 토크와 평형을 이룬 상태를 이루면서 브레이크 시스템은 일정 감속도로 정지하게 된다[9].

제조환경이 외국과 다른 국내에서 생산하는 항공기용 탄소/탄소 브레이크 디스크의 파손해석을 통한 설계는 아직까지 이루어지지 않았다. 탄소/탄소 브레이크 디스크의 설계 기술확보 및 자체 개발을 하기 위해서는 기본적인 디스크의 물성치 시험과 실제 상황과 유사한 강도시험 및 파손해석이 필요하다. 이와 같은 일련의 시험과 해석은 탄소/탄소 브레이크 디스크의 성능검증과 새로운 모델에 대한 설계기술 및 개발을 할 수 있는 초석이 된다. 이러한 상황에서 브레이크 디스크의 강도해석 및 실험은 필수적이다.

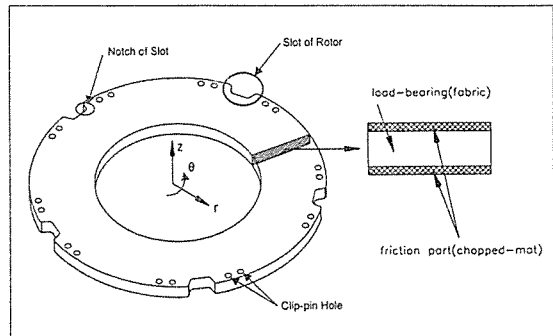


Fig. 1 Shape and cross sectional view of C/C B/D.

유재석등은 항공기용 탄소/탄소 브레이크 디스크의 기초 물성치를 측정하였다[10-14]. 이와같은 쿠폰시험(coupon test)의 다음 단계인 탄소/탄소 브레이크 디스크의 구조시험(structural test)을 통한 강도의 측정이 필요하다. 이와 같은 디스크의 구조강도시험은 실제 환경과 같은 다이نامो(dynamo)시험과 정적 강도시험으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 정적 강도 시험을 통한 디스크의 파손하중 측정에 초점을 맞추었다. 실제 브레이크 시스템이 작동하는 동안에 가장 취약한 부분인 로터 슬롯에 걸리는 하중 메카니즘을 도입하여 정적인 디스크의 강도를 측정하는 것은 더욱 발전된 디스크의 설계에 필수적이다. 본 논문에서는 디스크 강도 시험에 필요한 치구제작 및 강도시험을 수행하였다. 특히 제한된 실험 장비로 실제 상황과 흡사한 조건의 시험 치구를 제작 설계하기 위하여 유한요소 해석을 통하여 디스크 강도 시험 치구를 설계하였다. 또한 강도 시험의 실제 작동 상황이 반복대칭이라는 점을 착안하

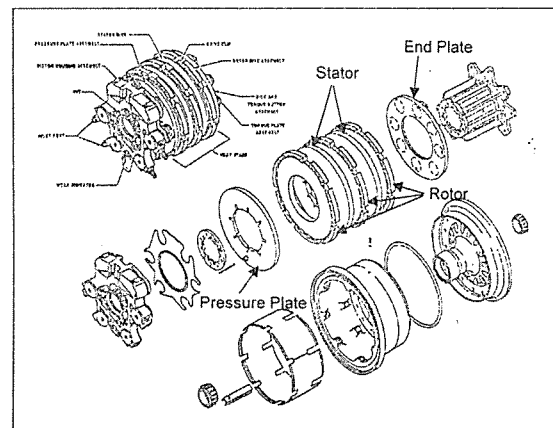


Fig. 2 Assembly of C/C B/D system.

여 디스크 전체모델과 반복대칭을 적용한 부분모델에 대한 유한요소해석결과를 비교하였다. 이상의 결과로 로터 슬롯주위의 강도측정을 위한 치구를 설계하였고, 또한 클립이 붙어 있지 않은 순수 브레이크 디스크에 대한 강도시험을 수행하였다.

## 2. 탄소/탄소 브레이크 디스크의 정적 강도시험

일반적으로 항공기의 제동시 제동력은 회전판의 슬롯에 가해지게 되며 이로 인하여 회전판의 슬롯에 응력집중이 발생하게 된다. 따라서 항공기용 브레이크 디스크의 설계시 슬롯주위의 거동해석 및 강도시험은 필수적이다. 본 연구에서는 브레이크 디스크의 슬롯주위의 강도시험을 위한 치구제작 및 슬롯주위의 거동해석을 수행하였다. 본 해석은 정적강도 시험치구를 설계하기 위해 마찰면의 경계조건을 조정함으로써 기존의 시험장치(Instron 1350)에 적합한 치구를 설계하기 위한 기본자료를 구하기 위하여 수행되었다. 정적강도 시험은 작동중인 브레이크 디스크와 흡사한 경계조건을 갖춰, 브레이크 디스크의 형상설계에 도움이 되는 자료를 얻기 위한 시험이다. 또한 설계된 시험치구를 이용하여 탄소/탄소 브레이크 디스크의 정적강도 시험을 수행하였다.

### 2.1 강도시험을 위한 치구제작

#### 2.1.1 치구설계를 위한 유한요소해석

해석은 상용유한요소 프로그램인 NISA-II를 이용하여 수행되었다. 해석에서 사용한 물성치는 Table 1과 같다[10]. 본 시험디스크에서는 2차원 직조섬유 24층이 무작위로 적층되어 있다. 따라서  $r$ - $\theta$ 평면은 준등방성 평면으로  $r$ 과  $\theta$ 방향의 물성치가 동일하다. 본 해석은 실제 브레이크 디스크의 구동조건과 흡사한 정적강도 시험을 유추하기 위한 치구를 설계하는 것이 목적이다. 실제 브레이크 시스템은 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 압력판 한 개, 회전판 세 개, 정지판 두 개와 끝판 한 개로 구성되며 정지판은 비행기 바퀴축과 연결되어 정지되어 있으며 회전판은 타이어와 연결되어 있어 회전하고 있고, 회전판에는 5개의 슬롯(slot)이 있다. 여기서 비행기를 정지시키기 위해서는 압력판에 압력을 가하여 회전판을 정지시켜야 한다. 이때 회전판과 정지판의 마찰로 인하여 시스템은 정지된다. 여기서의 압력

Table 1 Material properties of C/C B/D.

Properties	Symbol	Value[unit]
Elastic modulus in r-direction (or $\theta$ -direction)	$E_r$	59.3[GPa] <sup>#</sup>
Elastic modulus in z-direction	$E_z$	3.47[GPa] <sup>#</sup>
Poisson's ratio in r- $\theta$ plane	$\nu_{r\theta}$	0.3
Poisson's ratio in r-z plane (or $\theta$ -z plane)	$\nu_{rz}$	0.2
Shear modulus in r- $\theta$ plane	$G_{r\theta}$	2.41[GPa]
Shear modulus in r-z plane (or $\theta$ -z plane)	$G_{rz}$	1.38[GPa]
Tensile strength in r- $\theta$ plane	$r_T$	103.1[MPa] <sup>#</sup>
Compressive strength in r- $\theta$ plane	$r_C$	90.1[MPa] <sup>#</sup>
Tensile strength in z direction	$Z_T$	3.0[MPa] <sup>#</sup>
Compressive strength in z-direction	$Z_C$	118[MPa] <sup>#</sup>
Shear strength in r- $\theta$ plane	$S_{r\theta}$	34[MPa]
Shear strength in r-z plane (or $\theta$ -z plane)	$S_{rz}$	5.71[MPa] <sup>#</sup>

(<sup>#</sup> : measured properties, the other properties : reference[5],[6],[13])

은 정지판 축에 걸리는 토크(torque)값을 일정하게 하기 위해 시간에 따라 변하게 된다. 회전판의 운동을 살펴보면 Fig. 3에서 보듯이 고정축(z축)에 대한 강체의 회전운동으로 묘사 할 수 있으며, 회전판은 마찰력과 슬롯에 반력이 걸리면서 일정한 각감속도로 회전하는 동력학적 평형을 이룬다[9]. 그러나 회전축에 대한 질량관성모멘트와 각감속도를 곱한 항이 회전축에 대한 마찰력의 모멘트에 비해 훨씬 적으므로 정력학적 평형상태로 묘사 할 수 있고, 따라서 축에 걸리는 토크값과 슬롯의 반력에 의한 모멘트값이 같아진다. 또한 실제 구동시 항상 파손이 일어나는 곳은 회전판 슬롯의 노치 부위가 된다. 따라서 브레이크 디스크의 강도는 일정한 하중을 노치에 가하고 마찰면을 고정시킴으로써 구해질 수 있다. 실제 구동조건과 가장 흡사한 경계조건은 마찰면을 모두 고정시키고 5슬롯에 하중바(load bar)를 통해 하중을 가하는 것이다. 그러나 이 시험법은 실제로 구현하기에 많은 어려움이 있으므로 좀더 간단한 시험으로 위의 조건을 잘 묘사하기 위하여 아래와 같이 네가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 또한 실제 브레이크 디스크에서는 클립이 부착

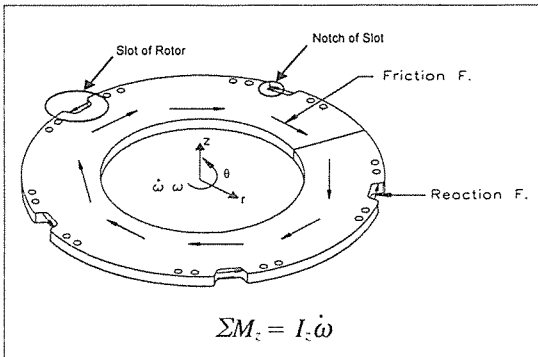


Fig. 3 Dynamic force equilibrium of the rotor disk.

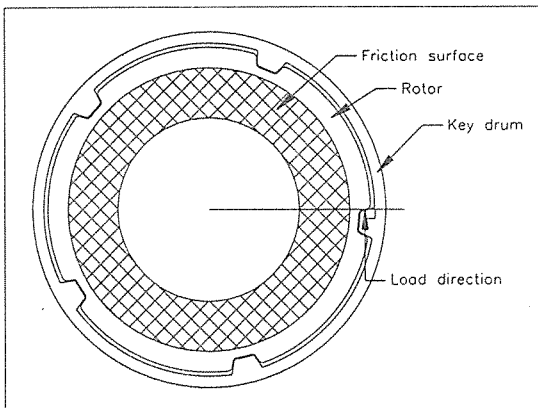


Fig. 4 Loading mechanism around notch.

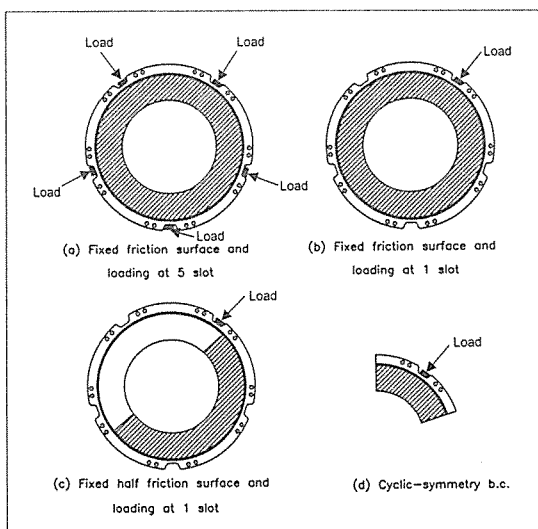


Fig. 5 Various boundary conditions of C/C B/D.

되어 있고, Fig. 4에서 보듯이 슬롯에 걸리는 하중은 키드럼(key drum)에 의해 접선방향으로 전달되므로 접선방향으로 일정한 변위가 형성된다. 따라서 슬롯에 브레이크 구동시 반력방향인 접선방향으로 균일 변위 경계조건을 가하였다.

- ① Fig. 5(a) : 회전판의 마찰면 양쪽을 고정 한 후 5개 슬롯 모두에 균일한 변위를 가한 경우.
- ② Fig. 5(b) : 회전판의 마찰면 양쪽을 고정 한 후 1개의 슬롯에 균일한 변위를 가한 경우.
- ③ Fig. 5(c) : 마찰면 중 절반을 고정시키고 1개의 슬롯에 균일한 변위를 가한 경우.
- ④ Fig. 5(d) : Fig. 5(a)의 모델에 반복경계조건을 가하여 부분모델을 해석한 경우.

### 2.1.2 결과 고찰

먼저 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)를 비교하면 파손경향과 Tsai-Wu 판단식의 최대파손지수가 6.6%이내에서 잘 일치하므로 한 슬롯에 가해지는 하중은 다른 슬롯부근에 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었다. 따라서 하중은 한 슬롯에만 가하여도 브레이크 디스크의 정적강도를 묘사할 수 있다. 이와 같은 시험에서 마찰면을 모두 고정시키면 브레이크 디스크의 강도를 잘 표현할 수 있다. 그러나 마찰면 전부를 고정하는 치구는 무게가 무거워지고 시험하기가 곤란하여 Fig. 7에서 보듯이 마찰면의 절반은 직접구속하고 나머지 절반은 링을 통하여 구속하는 치구를 구상하였다. 이에 하부 지지부가 시험시 미끄러짐이 일어날 수 있어, 극단적인 경우 (Fig. 5(c))로 마찰면의 절반을 구속하는 경계조건과 디스크 전부를 구속하는 경계조건(Fig. 5(a))의 유한요

Table 2 Comparison of maximum Tsai-Wu index for various b.c.

	Tsai-Wu (unaverage stress)	Tsai-Wu (average stress)
Fixed full b.c. and loading at 5 slot	0.3966	0.3051
Fixed full b.c. and loading at 1 slot	0.4288	0.3268
Fixed half b.c. and loading at 1 slot	0.3133	0.2413
Cyclic-symmetry boundary condition	0.3937	0.3032

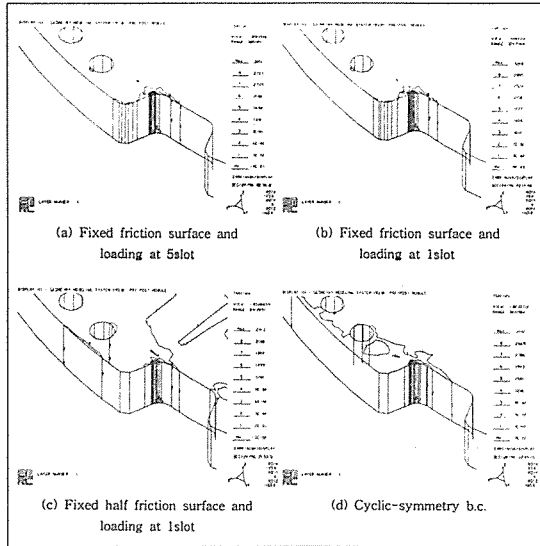


Fig. 6 Comparison of failure analysis for various b.c.

소해석을 비교하였다. 결과를 비교해보면 마찰면의 절반(Fig. 6(c))을 고정시킨 모델의 파손경향과 Tsai-Wu 판단식의 최대파손지수가 Fig. 6(a)에서와 같은 파손경향을 나타내며 Tsai-Wu 판단식의 최대파손지수가 21% 정도의 오차를 나타내었다. 그러나 실제 시험 시에는 하부 경계면이 미끄러지는 현상이 거의 나타나지 않아 Fig. 5(b) 경우의 해석결과가 실제 시험조건과 더 잘 일치한다고 볼 수 있다. 결과를 종합해보면, Fig. 8과 같이 설계된 시험치구는 Fig. 5(a)의 경계조건을 적절히 묘사한다고 할 수 있다. 또한 강도시험의 가장 근접한 모델(Fig. 5(a))이 반복대칭이라는 점을 착안하

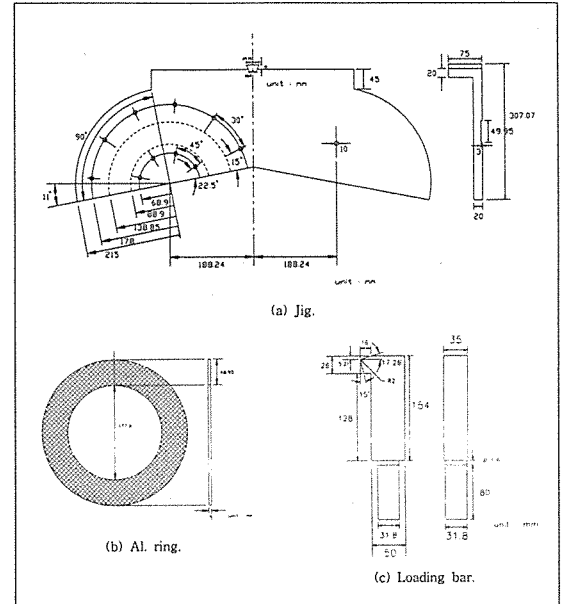


Fig. 8 Drawing of static strength test jig for C/C B/D.

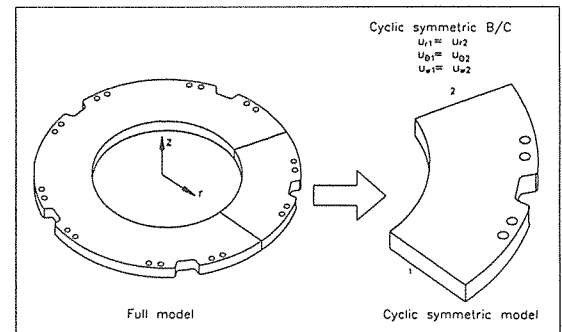


Fig. 9 Cyclic-symmetry boundary condition.

여 반복대칭 경계조건(Fig. 9)을 적용한 부분모델의 유한요소해석과 비교한 결과, 최대 Tsai-Wu index가 일치하였다. 이와 같은 결과는 유한요소해석시 전체모델의 해석을 대신하는 부분모델의 타당성을 나타내며 이후 클립을 고려한 좀 더 세밀한 모델링이 가능해진다. 각각의 경우에 대한 Tsai-Wu 판단식의 최대파손지수는 Table 2에 정리하였다. 여기서 사용된 Tsai-Wu 판단식은 아래와 같다.

### 2.1.3 Tsai-Wu 파손 기준

Tsai-Wu 파손 기준은 이방성 재료의 파손을 보다 정확하게 해석하기 위한 기준으로 1971년 Tsai와

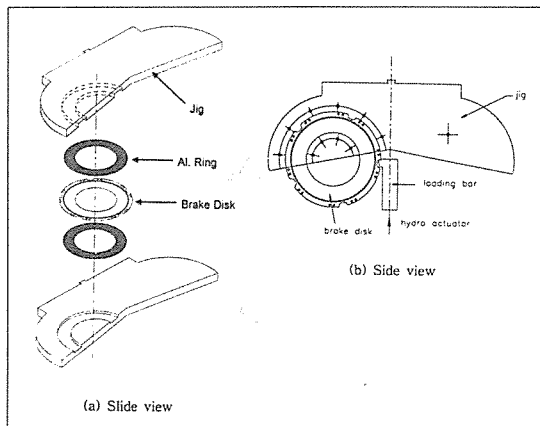


Fig. 7 Configuration of static strength test jig for C/C B/D.

Wu에 의해서 제시되었다. Tsai 와 Wu는 식(1)과 같이 파손을 나타내기 위한 scalar량으로써 2차의 항까지 파손식을 가정하였다.

$$f(\sigma_k) = F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1$$

$$i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

$F_i$  : strength tensor of the second rank

$F_{ij}$  : strength tensor of the fourth rank

식(1)을 3차원 문제에 대해 적용을 시키면 식(2)와 같이 된다.

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{44}\sigma_4^2 + F_{55}\sigma_5^2 + F_{66}\sigma_6^2$$

$$+ F_{11}\sigma_1 + F_{22}\sigma_2 + F_{33}\sigma_3 + F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{23}\sigma_2\sigma_3$$

$$+ F_{13}\sigma_1\sigma_3 = 1 \quad (2)$$

식(2)에서 각각의 strength tensor들은 다음과 같이 계산된다.

$$F_{11} = -\frac{1}{r_T r_C}, \quad F_{22} = -\frac{1}{\theta_T \theta_C}, \quad F_{33} = -\frac{1}{Z_T Z_C},$$

$$F_{44} = -\frac{1}{S_{r\theta}^2}, \quad F_{55} = -\frac{1}{S_{r_c}^2}, \quad F_{66} = -\frac{1}{S_{r\theta}^2},$$

$$F_1 = \frac{1}{r_T} - \frac{1}{r_C}, \quad F_2 = \frac{1}{\theta_T} - \frac{1}{\theta_C},$$

$$F_3 = \frac{1}{Z_T} - \frac{1}{Z_C}$$

$$F_{12} \text{ 는 } \sigma_1'' = \sigma_2'' = F_{(12)},$$

$\sigma_3 = 0, \sigma_4 = 0, \sigma_5 = 0, \sigma_6 = 0$ 인 2축 하중상태에서  $F_{12}$ 를 측정하여 구해야 한다.  $F_{23}, F_{13}$ 도 비슷한 방법으로 구할 수 있다. 그러나 2축 등하중시험은 구현하기가 어렵고, 대부분의 경우 이와 같은 상호작용을 하는 인자등은 파손판단식에 영향을 적게 미친다. 따라서 Tsai-Hhan[15]등은 아래와 같은 식으로 근사하였다.

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

$$F_{23} = -\frac{1}{2} (F_{22} F_{33})^{\frac{1}{2}}$$

$$F_{13} = -\frac{1}{2} (F_{11} F_{33})^{\frac{1}{2}}$$

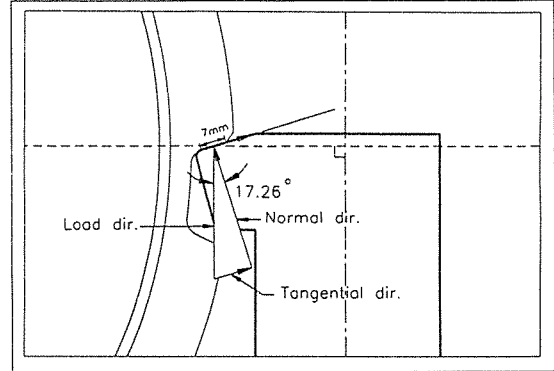


Fig. 10 Load direction and contact area.

## 2.2 강도시험

본 시험은 탄소/탄소 브레이크 디스크의 정적강도를 나타내기 위해 설계된 시험 치구를 이용하여 시험을 수행하였다. 치구설계를 위한 유한요소해석결과에서 보듯이 한 슬롯에 가해지는 하중은 다른 슬롯부근에 영향을 주지 않으므로 한 개 디스크의 모든 슬롯에서 시험을 할 수 있다. 본 시험에서는 클립이 부착되지 않은 2개의 탄소/탄소 브레이크 디스크에 대하여 7개의 슬롯에 대해 시험을 수행하였다. 하중이 전달되는 방향은

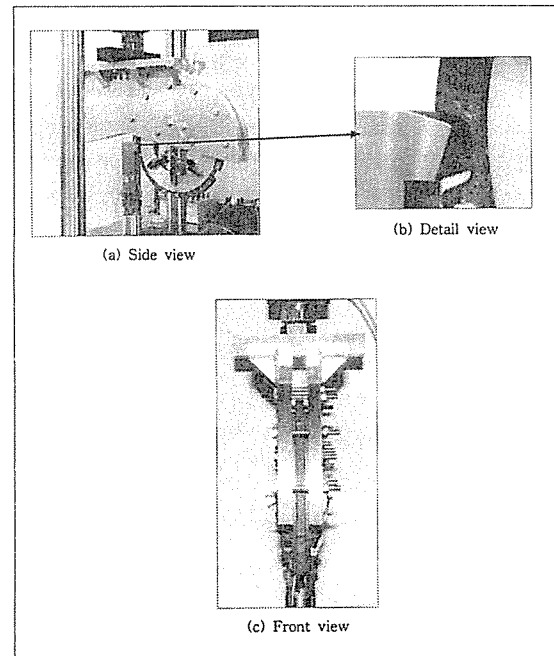


Fig. 11 C/C B/D static strength testing system.

Table 3 Static failure load of C/C B/D.

시험번호	파손하중(kgf)
c1	1086
c2	832.5
c3	778.8
c4	918.0
c6	813.0
c7	832.5
c8	878.9
평균	877.1
표준편차	102.5

Fig. 10에서 보듯이 슬롯에 걸리는 하중바는 디스크의 접선방향으로 하중이 전달된다.

### 2.2.1 시험장치구성 및 절차

본 시험에서의 강도시험장치구성은 Fig. 11(a)에서와 같이 하중전달부인 하중바와 디스크를 고정시키는 상부치구와 디스크의 마찰면과 직접 접촉하여 고정시키는 도너스형 링의 3부분으로 구성되어있다. 또한 시험절차는 아래와 같다.

- (1) 하중률은 1.5 mm/min을 사용하였다.
- (2) 하중바와 디스크홀의 접촉길이는 Fig. 10에서와 같이 곡률이 끝나는 곳에서부터 7mm로 하였고, 각 슬롯의 접촉길이를 측정하였다.
- (3) 규정한 하중률이 가해지도록 시험장치의 하중속도를 조절한다.
- (4) 하중과 변형도를 기록할 장치에 연결한 다음 하중을 가한다.
- (5) 파단이 일어날 때까지 시험을 수행한다.

### 2.2.2 시험결과 및 검토

브레이크 디스크의 정적파손하중은 Table 3에 나타내었고, 전형적인 하중바의 변위와 하중곡선은 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 보듯이 급격하게 하중이 떨어지는 지점은 접촉부분의 기지파손에 의한 층간분리가 일어나면서 하중이 급격히 떨어지는 것이 관찰되었다. 또한 접촉부분에서 일어날 수 있는 슬립현상을 설명하면, Fig. 10에서 알 수 있듯이 하중바와 접촉되는 접촉면의 방향이 반경방향에서 17.26° 기울어져 있다. 하중바의 하중방향은 디스크중심에서 접선방향으로 하중이 가해지므로 접촉면에 걸리는 힘은 접촉면의 접선방향과 수직방향의 힘으로 나누어지고, 접촉면의 접선방향의 힘에 의해 슬립현상이 일어나게 된다. 이와

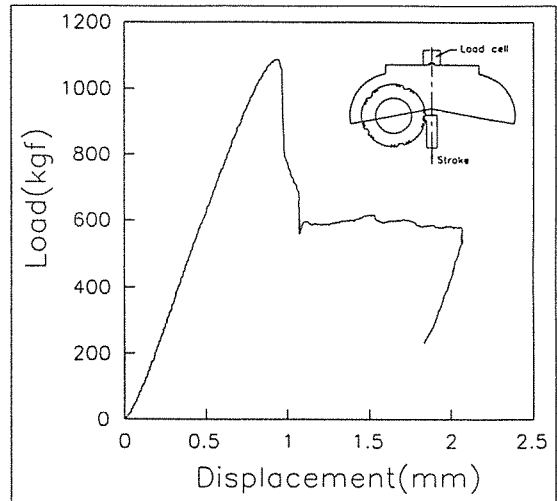


Fig. 12 Load-displacement curve for C/C B/D static strength test.

같은 슬립현상은 강도시험 뿐만 아니라 실제 브레이크 시스템에서도 나타나는데, 슬립에 의한 변위를 브레이크 드럼에서 고정시켜주므로 접촉면의 접선방향의 슬립현상이 어느 정도 억제된다. 이와 같은 슬립현상에도 불구하고 접촉면의 경사를 주는 이유는 슬롯에 걸리는 힘이 접촉면의 접선방향과 수직방향의 힘으로 나뉘어 지는데, 접선방향의 힘은 브레이크 키드럼(key drum)에 걸리고 나머지 수직방향의 힘만이 브레이크 슬롯에

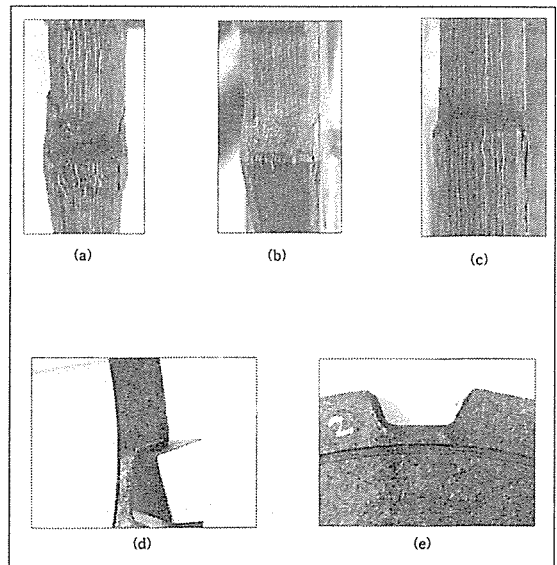


Fig. 13 C/C B/D after fracture.

결리므로 하중방향의 힘보다 작은 힘이 브레이크 접촉면에 결리게 된다. 본 강도시험에서의 슬립현상은 대부분이 알루미늄으로 된 상부치구에 의해 일어난다. 그러나 실제 시험상에서는 하중바에 의한 파손변위가 1mm 이내에서 일어나므로 이에 상응하는 슬립변위는 훨씬 더 작을 것이고 시험상에서도 슬립현상이 육안으로는 관측되지 않았다. 전형적인 파손형태는 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13의 (a), (b)와 (c)는 접촉부분의 기지파손과 원주방향으로 층간분리가 일어난 것을 보여준다. 또 Fig. 13의 (d)와 (e)는 층간분리 이후 하중바에 의한 변위를 더 가하게 되면, 양쪽 바깥면의 노치부분에서 파손이 일어남을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 볼 때 클립을 회전판의 슬롯에 끼우게 되면 일차적인 접촉면에서의 기지부분의 파손이 억제되고 또한 리벳연결에 의하여 두께방향으로 디스크를 단단하게 고정시키므로 층간분리 현상이 억제되어 디스크의 강도가 증가할 것이라 생각된다.

### 3. 결 론

1. 브레이크 디스크의 정적파손 강도시험을 하기 위한 정적강도 시험치구를 유한요소해석을 통하여 설계하였다.
2. 반복대칭 경계조건을 이용하여 전체모델과 부분모델의 유한요소해석을 하여 비교한 결과 서로 잘 일치하였다.
3. 탄소/탄소 브레이크 디스크의 정적강도 시험을 수행한 결과 파손하중은 877.1(Kgf)로 측정되었고, 전형적인 파손모드는 접촉부분의 기지파손과 원주방향으로 층간분리가 일어났고, 이후 하중바에 의한 변위를 더 증가시키면 로터 슬롯의 노치 부분에서 파손이 일어남을 알 수 있었다.

### 4. 참고문헌

1. Zagrodzki, P., "Analysis of Thermomechanical Phenomena in Multi-disk Clutches and Brakes", *Wear*, Vol.140, 1990, pp.291-308.
2. Sonn, H.W., and Kim, C. G., Hong, C. S., and Yoon, B. I., Transient Thermoelastic Analysis of Composite Brake Disks, *J. of Reinforced Plastics and*

*Composites*, Vol. 14, Dec., 1995, pp. 1337-1361.

3. Sonn, H.W., and Kim, C. G., Hong, C. S., and Yoon, B. I., Axisymmetric Analysis of Transient Thermoelastic Behaviors in Composite Brake Disks, *AIAA*, Vol. 10, No. 1, 1996, pp. 67-75.

4. 김진봉, 김정석, 김천곤, 손현우 "항공기용 브레이크 시스템의 과도기 열탄성 해석", 추계항공우주학회 초록집, 1996., pp. 485-492.

5. 김경희, "Carbon/Carbon Brake Disk의 3차원 파손해석", 한국과학기술원 석사학위논문, 1995, pp. 35

6. 손현우, "탄소/탄소 복합재 브레이크 디스크의 열탄성 연구", 한국과학기술원 박사학위논문, 1995, pp. 73

7. Chun-Gon Kim, Jung-Seok Kim, Jae-Seok Yoo, Chang-Sun Hong, and Byung-Il Yoon, "Thermoelastic and 3D Failure Analyses of Carbon-Carbon Composite Brake Disks", *Proceedings of ICCM 11*, Vol. 1, pp. 671-678, Gold Coast, Australia, 14th-18th July 1997.

8. 김정석, 김천곤, 홍창선, 김진봉, 윤병일, 김광수, "탄소/탄소 복합재 브레이크 디스크의 3차원 파손 해석", 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문초록집, pp.243-246, 충남대학교, 1997.

9. 김정석, 유재석, 김진봉, 김천곤, 홍창선, 윤병일, "탄소/탄소 복합재 브레이크 시스템의 2차원 과도기 열탄성 해석", 한국항공우주학회지, 제26권, 제6호, 1998, pp. 64-70.

10. 유재석, 김정석, 김천곤, 홍창선, 김광수, 윤병일, "탄소/탄소 브레이크 디스크의 기계적 특성에 관한 연구", 한국복합재료학회지, 제11권, 제3호, 1998, pp. 59-73.

11. "Standard Test Method for Compressive Strength of Carbon and Graphite", *ASTM Standards*, Standard C 695-91.

12. "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", *ASTM Standards*, Standard D 638M-93.

13. P. D. Copp, J. C. Dendis and S. Mall, "Failure Analysis and Damage Initiation in Carbon/Carbon Composite Materials under Three - Point Bending", *J. of Composite Materials*, Vol. 25, 1991, pp. 593-608.

14. 유재석, "탄소/탄소 브레이크 디스크의 기계적 특성에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1997.

15. I. M. Daniel and O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, 1994.