

論文

크랙이 존재하는 탄소/탄소 브레이크 디스크의 실험적/해석적 안정성 판별

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

Safety Estimation of the Carbon/Carbon Brake Disk Having Crack by Experimental/Analytical Method

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

ABSTRACT

In this paper, the safety of the crack existing between the load bearing part and the friction part in key slots was evaluated. The repetitive loading test considered impact damage was performed for the various crack models. Also, the probability of the crack propagation and the stress concentration at the crack tip were studied by using a FE analysis. By these method, safety of the disk was confirmed.

초 록

본 논문에서는 탄소/탄소 브레이크 디스크의 시험 운용중에 키 슬롯부위의 하중지지부와 마찰재 사이에서 발생하는 크랙의 안정성에 대한 연구를 수행하였다. 이렇게 발생한 디스크 크랙의 안정성을 판별하기 위하여, 발생한 여러 가지 모양의 크랙에 대하여 충격을 고려한 반복하중실험을 수행하였다. 또한 유한요소해석을 수행하여 크랙 팁(tip)의 응력집중현상과 진전가능성을 살펴보았다. 이와 같은 방법으로 디스크가 안정함을 확인하였다.

1. 서 론

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

기용 브레이크 디스크 시스템은 활주중인 항공기의 운동에너지를 열에너지와 마찰에너지로 변환시켜 항공기를 정지시키는 장치이다.

Fig. 1에서 보듯이 브레이크 디스크는 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.

F-16에 사용되는 B-32 탄소/탄소 브레이크 디스크의 기

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원

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

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

*** 한국항공우주산업 주식회사, 첨단복합재센터

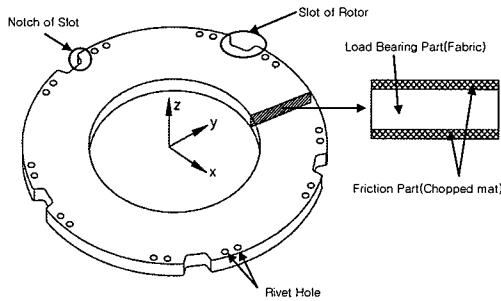


Fig. 1 Shape and cross sectional view of C/C B/D.

초 물성치는 이미 측정하였다[1]. 이와 같은 쿠폰실험(coupon test)의 다음 단계인 탄소/탄소 브레이크 디스크의 구조실험(structural test)을 통해 실제 제동 시의 하중을 묘사하여 탄소/탄소 브레이크 디스크의 안정성을 판단하는 것이 필요하다. 실제 착륙후 제동중에 생기는 마찰재 부위의 미소크랙이 전체 회전판과손에 미치는 영향을 판단하여, 브레이크 디스크의 안정성 판단의 기준을 제시하는 것이 본 연구의 목적이다. 이와 같은 안정성을 확보하기 위하여 회전판의 강도실험 치구를 설계하였고, 마찰재에 균열이 생긴 5개의 회전판 슬롯(slot)에 대하여 한 슬롯당 1500회의 안정성 판단실험을 수행하였다. 1500회의 실험횟수는 회전판의 교체수명으로 그 이상의 실험은 의미가 없으므로 1500회의 반복하중실험을 수행하였다.

디스크의 크랙은 여러가지 현상이 복합적으로 작용하여 진전할 수 있다. 제동 시 디스크에 발생하는 충격, 디스크에 일정하게 부과되는 하중, 제품의 제작 시에 내재된 크랙면 등과 같이 크랙을 진전시킬 수 있는 이유는 여러가지가 있다. 이러한 여러가지 이유로 인하여 크랙이 진전하는 모드도 여러가지로 달라질 수 있을 것이다. 초기에 디스크에 존재하는 미소크랙의 형상에 따라서 달라질 수 있으며, 리벳홀의 위치에 따라 디스크에 부과되는 하중이 다르므로 이에 따라서도 크랙이 진전할 수 있는 모드는 여러 가지가 있을 수 있다. 따라서 실험과 병행하여 디스크에 발생한 다양한 크랙을 묘사하고, 제동 시 디스크에 발생가능한 하중을 부과하여 디스크의 리벳홀에서 어떠한 거동을 보이는지 관찰하고, 이를 바탕으로 디스크의 파손안정성과 크랙 진전성향을 파악해보았다.

2. 회전판의 반복하중 부과실험

일반적으로 항공기의 제동 시 제동력은 회전판의 슬롯에 가해지게 되며 이로 인하여 회전판의 슬롯에 응력집중이 발생하게 된다. 이와 같이 슬롯에 부과되는 하중은 반복 및 충격하중으로 작용하여 본 연구에서는 이를 고려하여 회전판의 안정성을 검증하려 한다. 본 연구에서는 브레이크 디스크의 슬롯주위의 반복하중실험을 위한 치구제작 및 하중실험을 수행하였다.

2.1 회전판 하중실험을 위한 치구설계

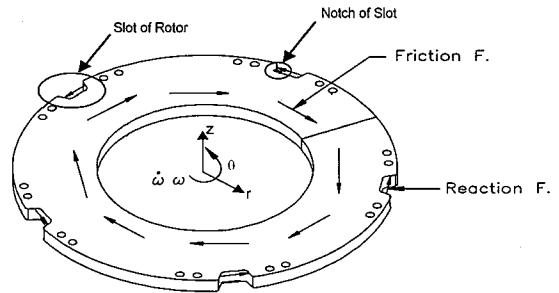


Fig. 2 Dynamic force equilibrium of the rotor disk.

$$\sum M_z = I_z \dot{\omega} \quad (1)$$

브레이크 디스크 시스템은 압력판 한 개, 회전판 세 개, 정지판 두 개와 끝판 한 개로 구성되어 있다. 정지판은 비행기 바퀴축과 연결되어 정지되어 있다. 회전판은 타이어와 연결되어 있어 회전하고 있으며, 회전판에는 5개의 슬롯이 있다. 여기서 비행기를 정지시키기 위해서는 압력판에 압력을 가하여 회전판을 정지시켜야 한다. 이때 회전판과 정지판의 마찰로 인하여 시스템은 정지된다. 압력판에 부과되는 압력은 정지판 축에 걸리는 토크(torque)값을 일정하게 하기 위하여 시간에 따라 변하게 된다. 회전판의 운동을 살펴보면 Fig. 2에서 보듯이 고정축(z축)에 대한 강체의 회전운동으로 묘사할 수 있으며, 회전판은 마찰력과 슬롯에 반력이 걸리면서 일정한 각속도로 회전하는 (1)번 식과 같은 동역학적평형을 이룬다. 그러나 회전축에 대한 질량관성모멘트와 각속도를 곱한 항이 회전축에 대한 마찰력의 모멘트에 비하여 훨씬 적으므로 정역학적 평형상태로 묘사할 수 있다. 따라서 축에 걸리는 토크값과 슬롯의 반력에 의한 모멘트값이 같아 진다. 또한 실제 제동 시 가장 약한 부분은 회전판의 슬롯 주위가 된다. 따라서 브레이크 회전판의 하중실험은 일정한 하중을 회전판의 접

선방향으로 슬롯에 가하고 마찰면을 고정시킴으로써 수행할 수 있다. 여기서 하중의 방향은 항상 회전판의 접선방향이어야 한다. 이는 Fig. 3에서 보듯이 실제 회전판 슬롯에 하중을 전달하는 키 드럼이 원형링의 형태로 생겼기 때문이다. 이와 같은 키 드럼은 항상 회전판의 접선방향으로 변형하려 한다. 따라서 키 드럼에 의해 회전판 슬롯에 가해지는 하중방향은 항상 회전판의 접선방향이 된다.

이와 같은 조건을 만족하는 회전판 하중실험장치구성은 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보듯이 회전판 하중실험치구는 하중전달부인 로딩바와 디스크를 고정시키는 상부치구와 디스크의 마찰면과 직접 접촉하여 고정시키는 도너스형 링의 세부분으로 구성되어 있다. 실험판찰은 직경이 16mm인 ccd 카메라를 사용하였다. 실제 회전판이 장착된 사진은 Fig. 5에 나타내었다. 회전판에 접선방향의 하중을 정확히 부과하기 위하여 Fig. 6과 같은 로딩바를 설계·제작하였다.

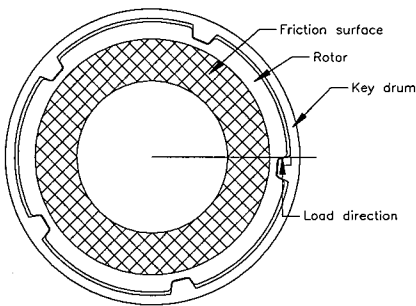


Fig. 3 Loading mechanism around notch.

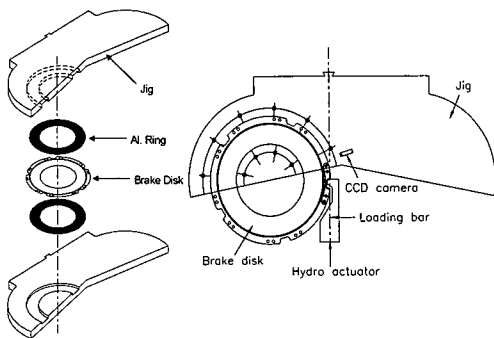
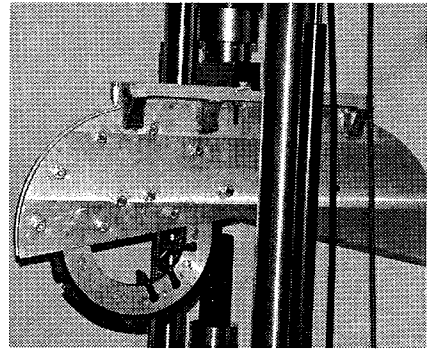
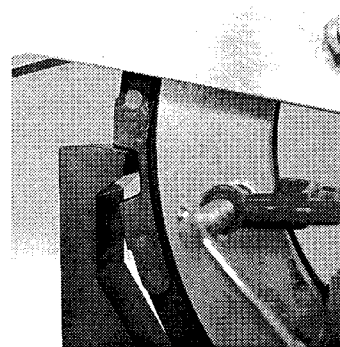


Fig. 4 Configuration of static loading test jig for C/C B/D.



(a) Side view



(b) Detail view

Fig. 5 C/C B/D load testing system.

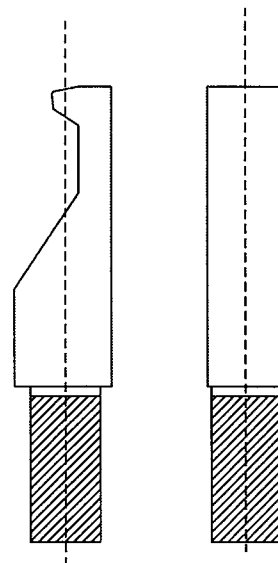


Fig. 6 Geometry of the loading bar.

2.2 하중조건

디스크의 슬롯당 부과되는 하중조건(p)은 실제 디스크에 걸리는 최대 토오크를 기준으로 아래의 식을 이용하여 구하였다.

$$T = p \times r \times 3 \times 5 \times v \quad (2)$$

T : Maximum torque at brake disk, 4520 N·m

(Measured value by dynamo test)

r : Distance from disk center to slot center, 153.4 mm

3 : Number of rotor

5 : Number of slot per rotor

v : Contact efficiency, 0.8

위 식에 의해 각 슬롯에는 2.5 KN정도의 하중이 걸린다. 그러나 초기 제동시에는 심한 충격이 발생하므로 충격 안전계수를 3으로 설정하여 7.5 KN의 하중을 부과하였다.

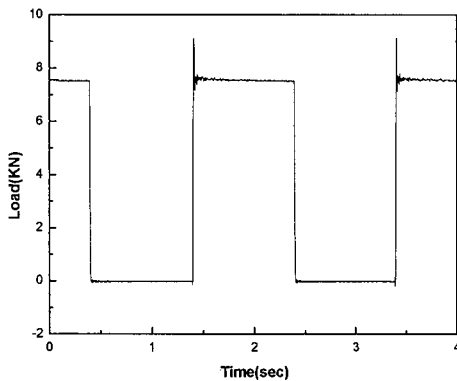


Fig. 7 Load history curve for C/C B/D static loading test.

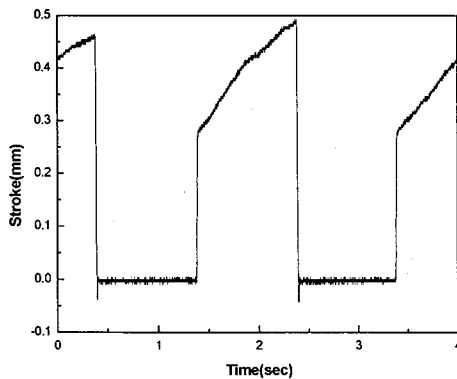


Fig. 8 Stroke history curve for C/C B/D static loading test.

디스크의 전체 수명은 마찰재의 마모량에 따라 좌우된다. 현재의 디스크는 약 1500회 정도의 착륙에 의해 디스크의 전체 마찰재가 모두 마모되므로 하중실험은 1500회로 설정하였다. 디스크에 부과되는 가장 큰 하중은 제동 초기의 충격하중이므로 안정성 평가 실험을 위하여 1초간 충격하중을 유지하였다. Fig. 7에는 시간에 따라 디스크에 부과된 하중의 이력을 나타내고 있다. Fig. 8에는 로딩바의 변위 이력을 나타내었다. 하중이력을 살펴보면 7.5 KN의 충격하중을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있으며, 초기에 하중의 오버슈트(overshoot)이 발생하였으나 이는 시스템에 더 큰 하중을 부과하는 것으로 이러한 하중으로도 시스템의 안정성에 문제가 발생하지 않으면 디스크 시스템은 파손에 안정적이라 예상할 수 있다. 실험장비는 최대하중 25 ton의 MTS를 사용하였다.

2.3 반복하중실험

본 실험은 디스크에 다양하게 발생한 크랙의 형상이 디스크의 사용기간동안 시스템의 안정성에 어떠한 문제를 유발시킬 것인가를 알아보는 것이다. 이를 위하여 탄소/탄소 브레이크 회전판의 하중실험을 모사하기 위한 실험 치구를 설계하였고, 다양한 크랙의 형상에 대하여 실험을 수행하여 각 크랙의 경우에 따른 시스템의 안정성 여부를 판단하였다.

실험 시편은 총 4장의 디스크에서 5 슬롯을 선택하여 실험을 수행하였다. 디스크에 발생한 크랙의 형상은 매우 다양하나 크랙이 발생한 위치와 크랙의 길이를 기준으로 각각 다른 경우에 대해서 실험을 수행하였다. 실험을 수행한 크랙의 길이는 10 mm, 20 mm, 35 mm인 경우를 선택하였다.

본 실험에서 사용된 시편은 실제 항공기에서 어느 정도 운용된 회전판이다. 회전판 마찰재의 크랙은 시제품의 리베팅시 리벳이 팽창하면서 특히 마찰재 부분에 잔류 압축응력을 유발하여 발생한 것이다. 이러한 잔류 압축응력에 키 드럼에서의 압축하중이 부과되어 잔류응력완화를 위하여 마찰재 부분의 크랙이 진전된 것으로 보인다. 그러나 어느 정도 운용하여 잔류압축응력이 완화된 회전판은 더 이상 크랙이 진전되지 않고 하중을 충분히 지지할 것이다.

3. 실험 결과 및 검토

회전판의 슬롯 5곳에 대하여 반복하중실험을 수행하였다. 슬롯 5곳에 대하여 각각 충격과 반복하중을 고려하여

7.5 KN의 하중을 1500회 반복실험한 결과 디스크의 리벳 주위에는 어떠한 변화도 발생하지 않았다.

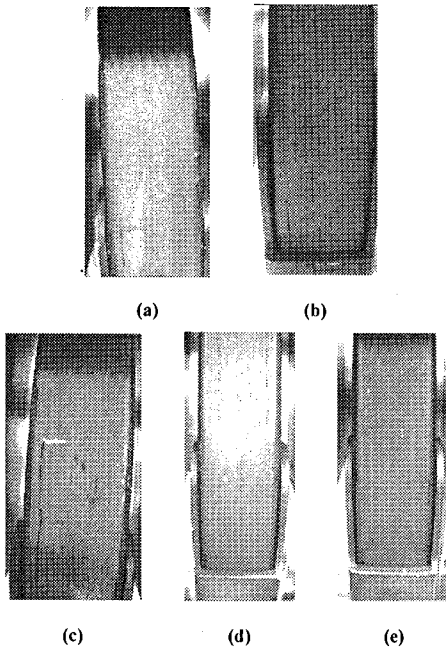


Fig. 9 Shape of the vicinity of the rivet before test.

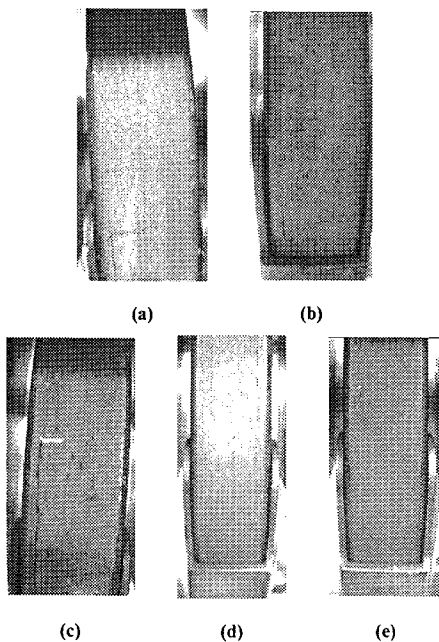


Fig. 10 Shape of the vicinity of the rivet after test.

※ Test specimen for Fig. 9 and Fig. 10 :

- (a) : 10 mm crack
- (b) : 20 mm crack
- (c) : 35 mm crack
- (d) & (e) : externally no crack

Fig. 9는 실험전의 형상이며, Fig. 10은 실험후의 형상을 나타내고 있다. 즉 크랙의 진전은 발생하지 않았고, 크랙이 관찰되지 않는 디스크에 대해서도 크랙은 발생하지 않았다. 따라서 실험을 수행한 디스크는 운용기간내의 반복적인 부과하중에 대해서 모두 안정적인 경향을 나타내었다. 이와 같은 실험결과를 볼 때, 마찰재 부위에 생긴 크랙은 길이에 무관하게 회전판의 안정성에 영향을 미치지 않는다고 생각된다.

4. 크랙을 내제한 디스크 시스템의 응력해석

디스크에 크랙이 존재하는 시스템에 대해서 디스크 운용 중 발생하는 하중이 디스크의 크랙에 어떠한 영향을 줄 수 있는지를 해석적인 기법으로 살펴보았다. 디스크에 발생한 크랙은 Fig. 1의 마찰재와 하중지지부 사이로 진전되므로 마찰재와 하중지지부 사이에 크랙을 모사하여 해석을 수행하였다. 디스크의 반복하중실험과 유사한 상황을 설정하고 하중을 정적으로 부과하였을 때 디스크의 크랙주위에 발생하는 응력분포를 살펴봄으로써 크랙의 발생가능성이나 진전가능성등을 알아볼 수 있다.

Fig. 5과 같은 시스템으로 충격을 고려한 시스템의 반복하중실험을 수행하였다. 디스크에 발생한 크랙이 클립밖으로 진전된 (a)-(c)의 경우는 Fig. 4와 같은 ccd카메라로 관찰이 가능하겠지만 크랙이 클립밖으로 진전되지 않은 (d)와 (e)같은 시편의 경우에는 클립내부에서 발생하는 현상을 전혀 알 수 없다. 따라서 이와 같은 경우에 대해서는 해석적인 기법을 통해서 규명하는 것이 바람직한 것이다.

4.1 회전판 시스템 구성 및 모델링

브레이크 시스템은 다음과 같이 4가지 부품들로 구성되어 있다.

- Carbon/carbon brake disk : Carbon/carbon composite
- Rotor clip : KSD 4195(Heat Resisting Steel Casting)
- Rivet : STS 304(Hot Rolled Stainless Steel)
- Key drum : Carbon steel

C/C 복합재의 물성은 유재석[1]에 의해 조사되어 있고, 금속재의 물성은 Table 1에 나타내었다[3].

Table 1 Mechanical properties of steel material component

	KSD 4195	STS 304	Carbon Steel
E (GPa)	205	205	210
ν	0.33	0.33	0.3

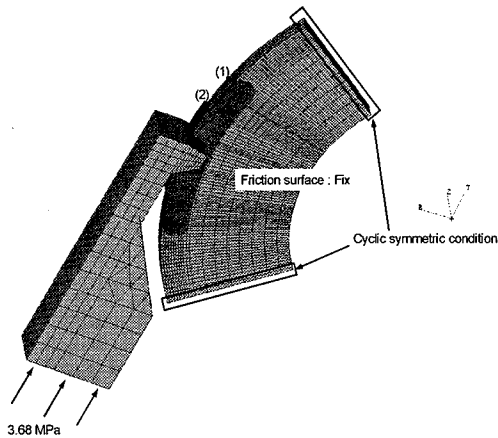


Fig. 11 Analysis model and boundary condition.

Fig. 11에는 해석모델과 경계조건을 나타내었다. 시스템의 모델링은 MSC/PATRAN을 사용하였고, ABAQUS를 사용하여 해석을 수행하였다. 각 부품간에는 서로 접촉이 발생하고 이로 인한 하중전달 메커니즘(mechanism)이 복잡하게 발생할 수 있다. 해석에 사용된 요소는 3차원 8절점 육면체요소 C3D8과 3차원 6절점 삼각기둥요소 C3D6요소이다. 전체 시스템은 디스크의 회전중심을 기준으로 일정한 형상이 반복되고 있다. 따라서 반복되는 최소형상만을 모델링하고, 그 경계면에 반복대칭조건을 부과하였다. 디스크는 두께방향으로 양쪽으로 대칭이 이루어진다. 반복하중실험에 사용된 시편은 모두 두께방향의 한쪽으로 치우쳐진 크랙을 지니고 있었다. 그러나 두께방향 양쪽으로 모두 마찰력과 압력이 부과되어 양쪽 모두 크랙의 발생 또는 진전 가능성이 있으므로 크랙이 양쪽에 동일하게 발생하였다고 가정하여 두께방향의 중심부에서 절반만을 모델링하고 해석을 수행하였다. 이로 인하여 두께 방향의 중심부분의 두께방향으로의 변위는 구속시켰다. 디스크의 반복하중부과 실험은 디스크의 마찰면을 고정시킨 후 키 슬롯에 로딩바로 하중이 전달된다. 따라서 디스크의 마찰면의 변위를 모

두 구속시켰고, 로딩바의 기둥부분에 원주방향으로 압력을 가하였다. 디스크에 부과한 하중은 실험시에 부과한 하중과 동일한 하중인 7.5 KN을 두께방향의 절반모델을 고려하여 3.75 KN을부과하였다. 이를 로딩바의 단면적으로 분포시키면 발생하는 압력은 약 3.68 MPa가 된다.

제동시에는 마찰열에 의해 디스크에 높은 온도가 발생하지만 실험과의 연관성을 위하여 온도경계조건은 고려하지 않았다[5].

크랙의 형상에 따른 변화를 관찰하기 위하여 다음과 같은 5가지 모델에 대해서 해석을 수행하였다. 가장 안전한 디스크 모델에서부터 크랙의 가장 극단적인 경우를 다음과 같이 선택하여 해석을 수행하여 그 결과를 살펴보고 모델의 안정성을 살펴보았다.

- (a) 크랙이 존재하지 않는 모델
- (b) Fig. 11의 (2)에서 원주방향으로 10 mm정도의 크랙
- (c) Fig. 11의 (2)에서 원주방향으로 40 mm정도의 크랙
- (d) Fig. 11의 (1)에서 원주방향으로 10 mm정도의 크랙
- (e) 마찰면을 제외한 부분의 마찰재 부분을 제거

응력집중현상의 세밀한 관찰을 위하여 크랙 팁 주변은 ABAQUS의 부분 모델링(sub-modeling)기법을 사용하여 관찰하였다.

4.2 응력해석결과

Fig. 12에는 해석모델 (b)의 변형형상을 나타내었다. 크랙의 개방모드(opening mode)가 관찰된다. 그러나 변형형상이 200배라는 것을 고려하면 크랙으로 인한 마찰재 부분의 개방모드는 크게 발생하지 않는 것임을 알 수 있다.

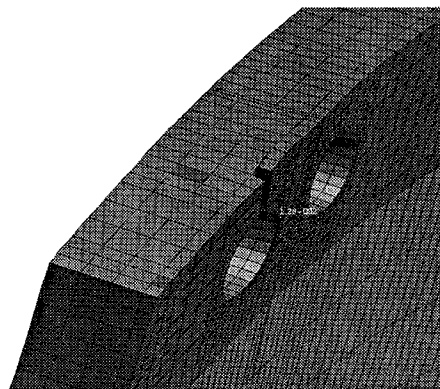
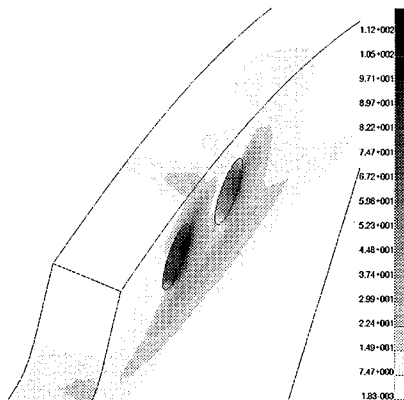
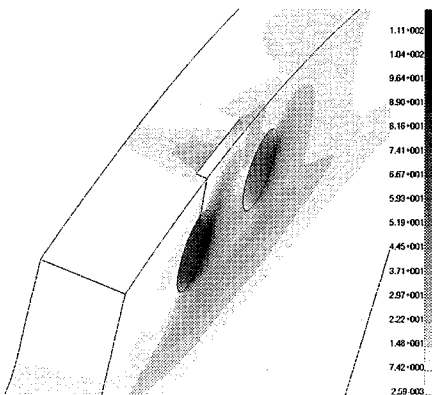


Fig. 12 Deformed shape of analysis model (b) (200 times).

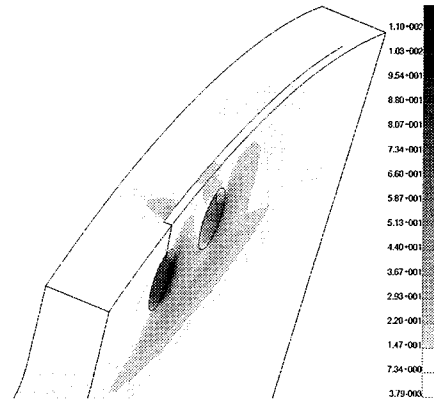
Fig. 13에는 홀 주위의 Von-Mises 응력분포를 나타내었다. 최대 응력은 모두 (2)번 홀에서 발생하였고, 크랙 팁에서의 특별한 응력집중현상은 관찰할 수 없었다. 즉 시스템의 안정성에는 크랙보다는 리벳으로 전달되는 하중의 차이에 의한 리벳 홀의 응력집중현상이 더 중요함을 알 수 있었다. 발생응력이 파손범위에 가까운 응력값들을 나타내어 디스크의 안정성에 문제가 발생한 것처럼 보인다. 그러나 디스크에 충격이 문제시되는 것은 제동이 되는 초기 아주 짧은 시간으로 그 이후에는 해석 시 부과된 하중의 3분의 1에 해당하는 하중이 부과된다. 따라서 제동중에 디스크에 부과되는 하중으로는 디스크 시스템의 안정성에 문제가 발생하지 않는다. 제동이 시작되는 시점에서는 이러한 파손 경향으로 인하여 디스크의 일부분인 탄소기지에 크랙이 발생할 수 있으나 이는 아주 짧은 시간동안에만 발생하며 디스크는 곧바로 안정적인 하중상태에 놓이게 되므로 시스템의 안정성에는 문제가 발생하지 않게 된다.



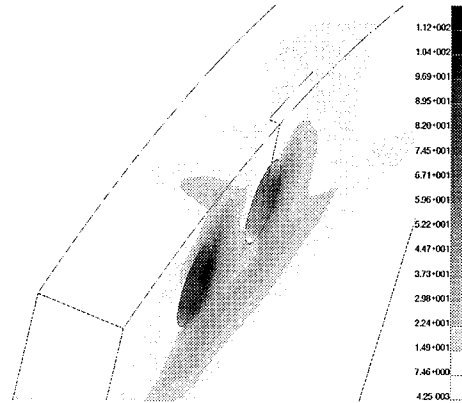
(a) No crack model



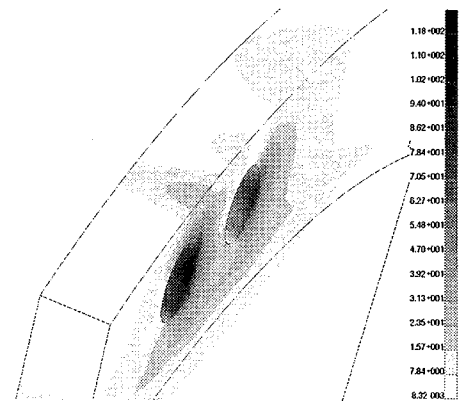
(b) 10 mm crack model from hole number (2)



(c) 40 mm crack model from hole number (2)



(d) 10 mm crack model from hole number (1)



(e) Friction part removed model

Fig. 13 Von-Mises stress (MPa) distribution near rivet holes.

5. 결 론

참고문헌

디스크의 리벳홀에 존재하는 크랙으로 인한 시스템의 안정성을 파악하기 위하여 디스크에 반복하중을 부과하여 디스크의 거동을 살펴보았다. 그리고 디스크의 파손안정성을 판별하고 디스크에 내재하는 다양한 크랙의 형상에 따라 디스크에 발생하는 변화를 관찰하기 위하여 응력해석을 수행하였다.

운용중 디스크에 크랙이 발생하여 크랙이 발생된 디스크에 대해서 충격을 고려한 하중을 디스크 시스템에 부과하여 운용횟수정도의 1500회의 반복하중실험을 수행하였다. 크랙의 길이가 10 mm, 20 mm, 35 mm인 3종류의 크랙이 존재하는 시편과, 관찰되지는 않았지만 크랙을 내재하고 있는 부분으로 예측되는 2종류의 시편에 대해서 실험을 수행하였다. 실험결과 디스크의 크랙에는 어떠한 변화도 발생하지 않았고, 추가적인 어떠한 크랙의 발생도 관찰되지 않았다.

디스크에 대한 응력해석을 수행한 결과, 제동이 시작되는 초기에는 디스크의 리벳홀부분에 높은 파손경향을 나타내었다. 그러나 전체적인 관점에서는 디스크의 안정성에 문제가 없음을 확인하였다. 디스크에 다양한 형상의 크랙을 모사하고 이에 따른 응력해석 결과의 변화를 알아보았다. 크랙팁에는 특이할 만한 응력집중현상은 발생하지 않았다.

실제로 디스크에 발생하는 크랙은 일정한 패턴을 지니지 않고 아주 다양하게 발생하였다. 이는 크랙이 운용중의 상황보다는 리벳홀 주위의 초기 상황에 매우 크게 좌우되는 것을 의미한다. 이 중에서 마찰재와 하중지지부 사이에서 발생한 크랙에 대해서는 실험과 해석을 통하여 디스크의 안정성에 큰 문제를 야기시키지 않는 것을 확인하였다. 그러나 만약 마찰재 부분이 아닌 디스크에 부과되는 하중의 대부분을 지지하는 하중지지부에 크랙이 생기게 되면 이는 디스크의 안정성에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다고 생각되며 교체하는 것이 바람직할 것이다. 그리고 즉각적인 디스크의 교체가 어려울 때는 운용중 수시로 크랙의 진전량을 확인하고 크랙의 진전량에 급격한 변화가 발생하면 교체하는 것이 바람직하다고 생각한다.

후 기

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

- 1) 유재석, 김정석, 김천곤, 홍창선, 김광수, 윤병일, "탄소/탄소 브레이크 디스크의 기계적 특성에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 제11권, 제3호, 1998, pp. 59-73.
- 2) 김경희, "탄소/탄소 브레이크 디스크의 3차원 파손 해석," 한국과학기술원, 석사학위논문, 1995.
- 3) Mechanical Properties Data Center, "Aerospace structural metals handbook," Mechanical Properties Data Center, Battelle Columbus Laboratories, 1980.
- 4) Isaac M. Daniel, Ori Ishai, *Engineering Mechanics of composite materials*, Oxford, New- York, Toronto, 1994.
- 5) 오세희, 유재석, 김천곤, 홍창선, 김광수, 박종현, "탄소/탄소 브레이크 디스크의 열탄성 해석과 3차원 응력해석 및 설계," 한국복합재료학회지, 제15권, 제1호, 2002, pp. 42-51.