

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(5), 390-397(2014)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.5.390>

휠타워 시험 수행을 위한 무힌지 블레이드 플렉서 굽힘 강성 보강

김태주*, 기영중**

Hingeless Blade Flexure Bending Stiffness Reinforcement for Whirl Tower Test

Taejoo Kim* and Youngjoong Kee**

Korea Aerospace Research Institute Rotor Team*,**

ABSTRACT

BO-105 helicopter applies hingeless rotor hub system and blade root uses a flexure of hingeless rotor hub system. So bending stiffness reinforcement for flexure was conducted for preparation of whirl tower test using BO-105 blade. Bending moment of flexure area was calculated with FE modeling of section shape for stiffness reinforcement of flexure and thickness of composite material for reinforcement was chosen. Flexure bending stiffness reinforcement was conducted and bending stiffness measurement test was performed before and after bending stiffness reinforcement. And the test data are compared with analysis results.

초 록

BO-105 헬리콥터는 무힌지 로터 허브시스템이 적용되었으며, 블레이드의 루트 영역이 무힌지 허브 시스템의 플렉서에 해당한다. 따라서 본 블레이드를 이용한 휠타워 시험 수행을 대비하여 굽힘 강성이 낮은 플렉서 부분에 대한 굽힘 강성 보강을 수행하였다. 플렉서 굽힘 강성 보강 수행을 위해 플렉서 부분의 단면 형상을 모델링하여 굽힘 강성을 계산하였으며, 이를 바탕으로 강성 보강을 위한 복합재의 두께를 선정하였다. 보강된 플렉서의 실제 굽힘 강성을 확인하기 위하여 강성보강 전 형상에 대한 강성 측정 시험과 강성 보강 이후 형상에 대한 강성 측정 시험을 수행하여 결과를 비교하였다.

Key Words : Hingeless Hub System(무힌지 허브 시스템), Flexure(플렉서), Bending Stiffness Reinforcement(굽힘강성 보강), Sectional Properties Analysis(단면 물성치 해석)

1. 서 론

BO-105는 5,000lbs급 4엽 헬리콥터로서 무힌지형 로터 허브(Hingeless rotor hub) 기술을 적용

한 헬리콥터이다⁽¹⁾. BO-105 로터 허브 시스템은 Fig. 1과 같이 허브에 피칭 모션을 위한 베어링이 장착되어 있으며, 블레이드 루트 부분에 무힌지 허브 기술⁽²⁾이 적용된 플렉서(Flexure)가 위치하

† Received: February 18, 2014 Accepted: April 25, 2014

* Corresponding author, E-mail : ktj@kari.re.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

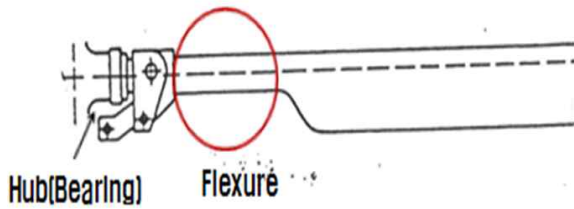


Fig. 1. BO-105 Rotor System

여 플레핑과 리드래그 움직임을 구현해주고 있다. BO-105 블레이드는 과거 많은 공학자들의 연구를 통해 많은 실험적 데이터가 공유되고 있으며⁽³⁾, 현재 한국항공우주연구원에서도 다양한 로터 시스템에 대한 실험용 회전시험을 수행할 수 있는 휠타워 시험설비(Whirl tower test facility)⁽⁴⁾와 함께 BO-105 블레이드를 보유하고 있다.

항우연이 보유한 휠타워 시험설비는 BO-105 블레이드가 실제 장착되었던 무힌지형 허브 시스템 뿐 만 아니라 전관절형 허브 시스템(Fully articulated hub system) 및 무베어링형 허브 시스템(Bearingless hub system)에 대한 회전시험이 가능하다. 그리고 BO-105 블레이드는 다양한 허브 시스템에 대한 개발 및 개량 연구 과정에서 회전시험을 수행하기 위해 확보한 블레이드이다. 따라서 허브시스템 회전시험 수행을 위해 사용될 BO-105 블레이드 역시 이런 다양한 허브시스템에 사용될 수 있도록 개조/보완이 필요하다. 이를 위해서는, 허브 구성품과 마찬가지로 이미 플레핑/래그 힌지 역할을 수행하고 있는, 플렉서 부분을 제거하거나⁽⁵⁾ 굽힘 강성 보강을 수행하는 방안이 있다.

본 연구에서는 다양한 형태의 허브시스템에 BO-105 무힌지 로터 허브용 블레이드를 적용할 수 있도록 플렉서 부분 굽힘 강성 보강을 수행하였으며, 이를 위해 보강 두께 선정을 위한 단면 해석을 수행하고 복합재를 사용한 굽힘 강성 보강을 진행하였으며, 플렉서 부분에 대한 굽힘 강성 보강 전후의 강성을 측정하여 단면 해석 결과의 적절성을 확인하였다.

II. 본 론

2.1 BO-105 블레이드 플렉서 굽힘 강성 보강

2.1.1 굽힘 강성 보강을 위한 해석 영역 설정

BO-105 블레이드 플렉서의 굽힘 강성 보강을 위해서는 먼저 플렉서의 보강 전 실제 강성값을

Table 1. BO-105 Blade Root Area Stiffness Value

Stiffness	Section	
	629mm	830mm
EI_{yy} (N.mm ²)	1.2E+10	8.9E+09
EI_{zz} (N.mm ²)	1.1E+11	9.2E+10

Table 2. BO-105 Blade Root Area Target Stiffness

Stiffness	Target Value
EI_{yy} (N.mm ²)	> 9E+09
EI_{zz} (N.mm ²)	> 2E+11

확인하여야 한다. BO-105 블레이드 플렉서 부분의 강성 값은 참고문헌⁽⁶⁾을 통해 확인하였다. 참고문헌에서는 BO-105 로터 시스템의 허브 중심점을 기준으로 거리 629mm 단면과 830mm 단면에 대한 강성 값이 제시되었으며, 본 연구에서 다루지 않는 인장 강성과 뒤틀림 강성을 제외한 플레핑 굽힘 강성 값(EI_{yy})과 래그 굽힘 강성 값(EI_{zz})을 Table 1에 나타내었다.

Table 1을 통해 나타낸 강성 값을 살펴보면 629mm 단면보다 830mm 단면의 강성이 더 낮음을 알 수 있다. 따라서 강성이 낮은 830mm 부분의 강성 보강 결과가 목표 강성 이상이 나오면 다른 영역은 자연스럽게 목표 강성 이상의 값이 나올 것으로 예측되므로 830mm 단면을 기준으로 강성 보강을 위한 2차원 단면 물성치 해석을 수행하기로 하였다.

본 연구를 위한 목표 굽힘 강성값은 Table 2에 나타내었다. 플레핑 강성과 래그 강성의 최소값 기준은 BO-105 블레이드 에어포일 영역의 플레핑 및 래그 굽힘 강성⁽⁶⁾을 기준으로 하였다.

2.1.2 굽힘 강성 보강 방법 설정

굽힘 강성 보강을 위한 방안은 탄성 계수(Young's modulus, E)가 큰 소재를 추가 적용하는 방법과 단면 형상을 변경하여 2차 관성 모멘트(2nd Moment of Inertia, I_{yy} , I_{zz})를 증가시키는 방법이 있다. 본 연구에서는 BO-105 블레이드 플렉서 굽힘 강성 보강을 위하여 뒷전 영역에 폼(Foam)을 적용하여 래그 굽힘 강성 증가를 위한 2차 관성모멘트(I_{zz})를 키웠으며, 스킨의 재질과 동일한

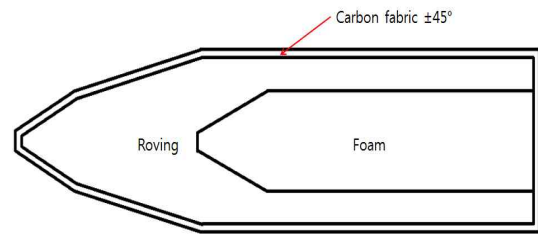
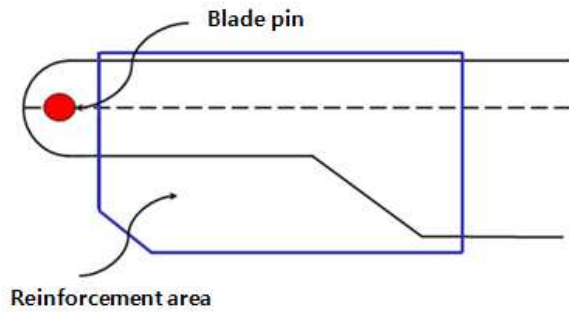


Fig. 4. BO-105 Blade 830mm Section Modeling

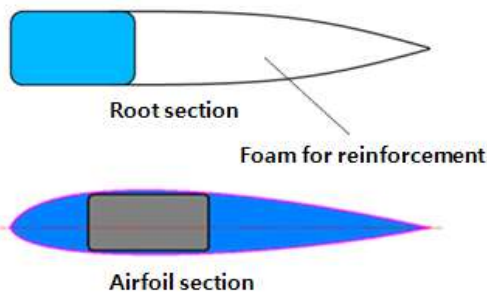


Fig. 2. BO-105 Blade Flexure Reinforcement Method

소재인 Carbon Fabric ±45°로 플렉서 영역과 뒷전 폼을 감싸서 플랩 및 래그 굽힘 강성을 보장하는 방법을 선정하였다. 이 때 전체 플렉서 영역의 공기 역학적 형상 유지를 위해 뒷전 영역에 적용되는 폼의 형상은 블레이드 뒷전 형상과 유사한 유선형상을 선정하였다. 또한 플렉서 뒷전 영역에 적용할 폼의 길이는 전체 코드 길이가 블레이드 에어포일 영역의 코드 길이에 맞도록 설정하였다. 이러한 보강방법은 Fig. 2에 나타내었다.

2.1.3 단면 물성치 해석을 위한 모델링 설정

BO-105 블레이드 플렉서 강성 보강을 위한 Carbon Fabric ±45° 적용 두께를 결정하기 위하여 830mm 단면 형상에 대한 모델링을 수행하고, 각각의 부위에 대한 재료 특성을 적용하여 플랩 및 래그 굽힘 강성을 계산하였다. 다음의 Fig. 3

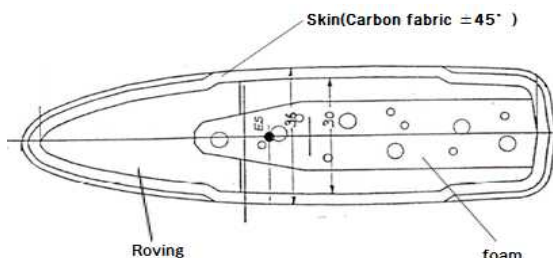


Fig. 3. BO-105 Blade Flexure Section Shape - 830mm

Table 3. BO-105 Blade Material Property

Material	Property (N/mm ²)	
	E	G
Glass Roving	E	4E+04
	G	4E+03
Foam	E	2E+01
	G	3E+00
Carbon Fabric ±45°	E	1E+04
	G	2E+04

Table 4. BO-105 Blade Flexure Bending Stiffness Analysis Result

Stiffness	Result		Difference
	Real Data	Analysis Data	
E _{yy} (N.mm ²)	8.9E+09	8.4E+09	5.6%
E _{zz} (N.mm ²)	9.2E+10	9.2E+10	0.8%

은 블레이드 830mm 단면의 형상을 나타내고 있다. Fig. 3의 단면 형상을 Fig. 4와 같이 단순화 모델링 하고 Table 3의 재료 특성을 적용하여 굽힘 강성을 계산하고 이 결과를 참고자료에서 제시된 굽힘강성 값과 비교하였다. 이 때 굽힘 강성 도출을 위한 단면 물성치 해석에는 VABS⁽⁷⁾를 사용하였다. Table 4의 해석결과에 따르면 참고자료⁽⁶⁾와 해석 결과 간의 차이가 최대 5.6% 정도임을 확인할 수 있다.

2.1.4 보강재를 적용한 모델의 단면 물성치 해석

본 해석의 목적은 정확한 굽힘 강성값을 도출하는 것이 아니라 특정수준 이상의 강성이 나오도록 보강 방법을 결정하는 것이므로 플랩 굽힘

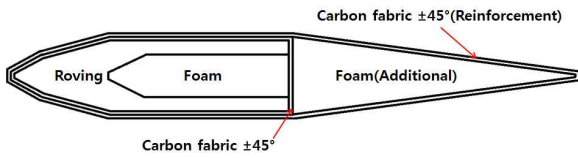


Fig. 5. BO-105 Blade 830mm Section Reinforcement Modeling

Table 5. BO-105 Blade Flexure Bending Stiffness after Reinforcement

Stiffness	Result	
	1mm Reinforcement	1.6mm Reinforcement
EI_{yy} (N.mm ²)	1.3E+10	1.4E+10
EI_{zz} (N.mm ²)	2.2E+11	2.7E+11

강성 해석결과에서 나온 5.6% 차이를 감안하고 단순화된 모델링 형상을 그대로 사용하였다.

굽힘 강성 보강을 위한 Carbon Fabric ±45°의 적용 두께는 1mm와 1.6mm를 선정하였으며, 각각의 형상에 대한 단면 물성치 해석을 수행하여 플랩 굽힘 강성 및 래그 굽힘 강성을 도출하였다. Fig. 5는 보강 형상 모델링을 보여주고 있으며 Table 5는 해석결과를 나타내고 있다.

Table 5의 결과를 Table 2의 목표 강성값과 비교해 볼 경우 Carbon Fabric ±45° 1mm 보강 시 플랩 굽힘 강성은 목표 강성 대비 49%의 강성 여유를 가지게 되며, 1.6mm 보강 시 60%의 강성 여유를 가지게 된다. 또한 래그 굽힘 강성의 경우 1mm 보강 시 목표 강성 대비 10%의 강성 여유를 가지게 되며, 1.6mm 보강 시 35%의 강성 여유를 가짐을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 앞서 언급한 해석 모델의 플랩 방향 및 래그 방향의 강성 오차를 감안하더라도 충분히 목표 강성을 확보할 수 있음을 의미한다.

2.1.5 플렉서 굽힘 강성 보강

BO-105 블레이드 플렉서 영역의 보강 전후에 대한 굽힘 강성 해석 결과를 토대로 강성 보강을 수행하였다. 실제 강성 보강 작업 수행 시 폼의 뒷전 끝단 부분은 E-glass를 스펜방향으로 적용하여 래그 강성 보강효과를 더 높였으며, 복합재로 보강할 수 없는 금속재로 구성된 블레이드 핀 체결 영역의 뒷전 부분은 금속 지지대를 적용하여 뒷전 탭 부분의 하중 경로를 구성하였다. 그리고 금속 지지대와 볼트로 체결되는 부분은 폼 대신

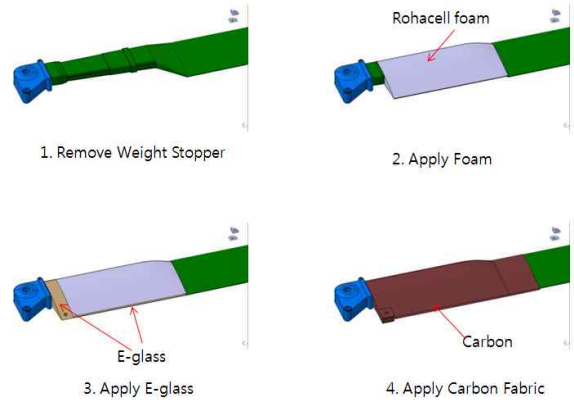


Fig. 6. Reinforcement Procedure

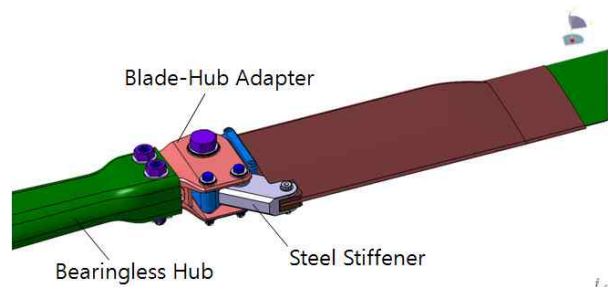


Fig. 7. Reinforcement Result

E-glass로 보강하여 구조강도를 높였다. 다음의 Fig. 6은 보강 작업 순서를 나타내고 있으며, Fig. 7은 최종 보강 형상을 나타내고 있다.

Carbon fabric ±45°의 보강 두께는 해석결과를 토대로 1.6mm를 기준으로 결정하였다. 본 보강에 사용되는 소재는 1ply의 두께가 0.25mm이므로 총 7ply를 적용하여 1.75mm가 보강되도록 하였다.

2.2 BO-105 블레이드 플렉서 굽힘 강성 측정

2.2.1 보강 이전 형상에 대한 강성 측정

먼저 BO-105 블레이드 플렉서의 강성 보강 이전 형상에 대한 굽힘 강성을 측정하였다. 측정 위치는 허브 중심으로부터 543mm, 733mm, 973mm, 1123mm 떨어진 위치를 선정하였다. 해석결과와 시험결과를 직접적으로 비교하기 위해서는 830mm 단면의 굽힘 강성을 측정해야 하지만, 830mm 단면 위치에 수동 진동 저감장치인 원심력진자(Centrifugal Pendulum)의 원심력 방향 멈춤 장치가 위치하고 있어서 스트레인 게이지 부착을 통한 굽힘 강성 측정이 어려웠다. 따라서 830mm 단면에서 가까운 733mm 단면과 973mm 단면의 굽힘 강성을 측정한 후 선형 보간법을 적용하여 비교하였다. 스트레인게이지 부착 단면의

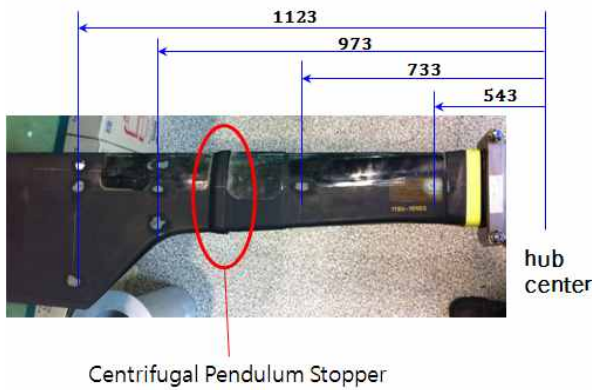


Fig. 8. BO-105 Blade Strain-gage Location

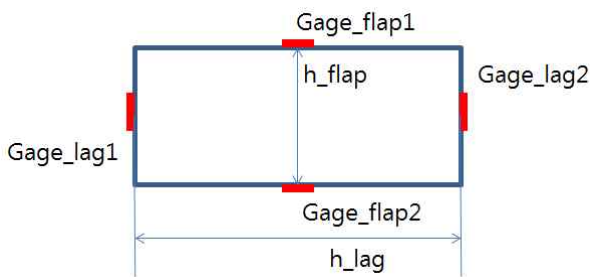


Fig. 9. Strain-gage Location

위치 및 보강 전 블레이드 플렉서의 형상을 Fig. 8에 나타내었다.

굽힘 강성 측정을 위한 센서로는 스트레인게이지를 이용하였다. 플랩 굽힘 강성 측정을 위한 스트레인게이지를 블레이드 상부와 하부 표면에 하나씩 붙이고, 래그 굽힘 강성 측정을 위한 스트레인게이지를 블레이드 앞전과 뒷전 표면에 하나씩 부착하였다. Fig. 9는 플랩 및 래그 굽힘강성 측정을 위한 스트레인게이지 부착 위치를 나타내고 있다.

굽힘 강성 측정을 위한 굽힘 모멘트를 부가하기 위하여 허브 중심으로부터 2,000mm 떨어진 위치에 무게 추를 적용하였다. 적용 중량은 래그 강성 측정을 위하여 총 24.2kg을 적용하였으며, 플랩 강성 측정의 경우 중량에 의한 처짐이 많이 발생하여 19.2kg을 적용하였다. 총 5개의 블레이드 중 2개의 블레이드에 대한 강성 측정 시험을 통해 블레이드 별 굽힘 강성의 유사성을 확인하였으며, 각 블레이드에 대해 플랩, 래그 강성을 각각 3회씩 측정하여 시험결과의 반복성을 확인하였다. 최종 굽힘 강성 값은 3회 시험결과의 평균값을 적용하였다. Fig. 10, 11은 BO-105 블레이드 플렉서 영역의 플랩 강성 및 래그 강성을 측정하는 시험 장면을 보여주고 있으며 Fig. 12, 13은 시험을 통해 측정된 스트레인게이지 신호를

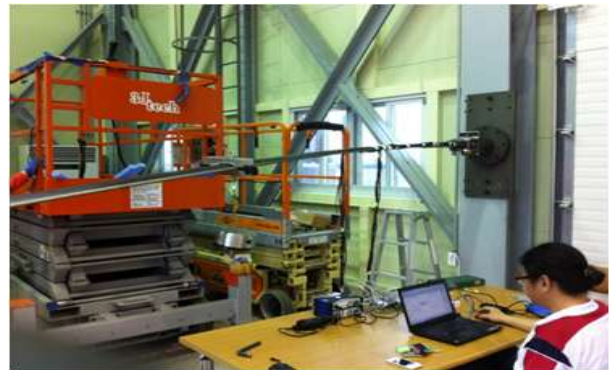


Fig. 10. Flap Stiffness Measurement Test



Fig. 11. Lag Stiffness Measurement Test

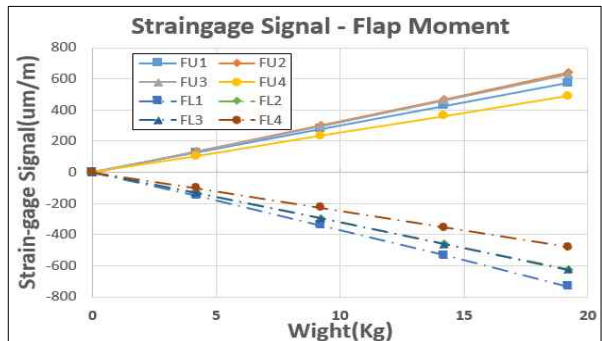


Fig. 12. BO-105 Blade Strain-gage Data - Flap Moment

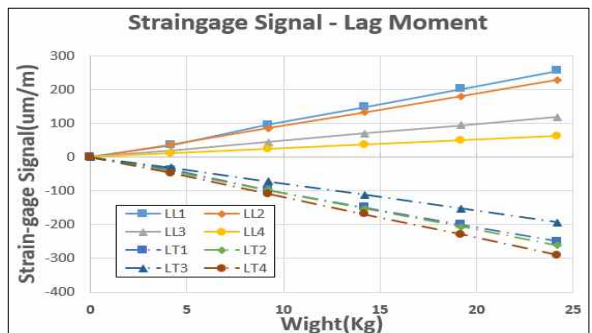


Fig. 13. BO-105 Blade Strain-gage Data - Lag Moment

Table 6. BO-105 Blade Bending Stiffness Measurement Test Results - Before Reinforcement

Stiffness	Measurement Data		Interpolation Result
	733mm	973mm	830mm
EI_{yy} (N.mm ²)	8.6E+09	7.0E+09	8.0E+09
EI_{zz} (N.mm ²)	7.8E+10	1.1E+11	9.2E+10

Table 7. Comparison of the Test Data and Analysis Value - Before Reinforcement

Stiffness	830mm Section		Difference
	Test Data	Analysis Value	
EI_{yy} (N.mm ²)	8.0E+09	8.5E+09	5.77 %
EI_{zz} (N.mm ²)	9.2E+10	9.2E+10	0.08 %

나타내고 있다.

이렇게 측정된 데이터를 기초로 각 단면의 굽힘 강성을 계산하였다. 단면의 굽힘 강성은 다음의 식 (1,2)를 통해 도출된다.

$$E \times I_{flap} = \frac{M_{flap} \times h_{flap}}{\epsilon_{flap1} + \epsilon_{flap2}} \quad (1)$$

$$E \times I_{lag} = \frac{M_{lag} \times h_{lag}}{\epsilon_{lag1} + \epsilon_{lag2}} \quad (2)$$

where $E \times I$: Bending Stiffness
 M : Applied moment
 h : Distance between two gauge
 ϵ : Strain value

계산을 통해 도출한 각 단면의 강성 값을 해석을 통해 예측한 강성 값과 비교하여 Table 6, 7에 나타내었다.

2.2.2 굽힘 강성 보강 형상에 대한 강성 측정

BO-105 블레이드 플렉서 보강 형상에 대한 굽힘 강성 측정은 보강 이전 형상과 동일한 방법으로 수행하였다. Fig. 14는 강성 보강이 완료된 BO-105 블레이드 형상을 보여주고 있으며, Fig. 15는 굽힘 강성이 보강된 블레이드의 굽힘 강성 측정 시험 장면을 보여주고 있다. 시험을 통해

측정한 굽힘 강성 값과 해석을 통해 예측한 굽힘 강성 값을 비교하여 Table 8, 9에 나타내었다.



Fig. 14. Reinforced BO-105 Blade



Fig. 15. Reinforced BO-105 Blade Flap Stiffness Measurement Test

Table 8. BO-105 Blade Bending Stiffness Measurement Test Results - After Reinforcement

Stiffness	Measurement Data		Interpolation Result
	733mm	973mm	830mm
EI_{yy} (N.mm ²)	1.2E+10	9.7E+09	1.1E+10
EI_{zz} (N.mm ²)	2.9E+11	2.8E+11	2.9E+11

Table 9. Comparison of the Test Data and Analysis Value - After Reinforcement

Stiffness	830mm Section		Difference
	Test Data	Analysis Value	
EI_{yy} (N.mm ²)	1.1E+10	1.5E+10	26.26 %
EI_{zz} (N.mm ²)	2.9E+11	2.7E+11	-6.87 %

Table 10. Comparison of the Before and After Reinforcement

Stiffness	Before Reinforcement	After Reinforcement	Increment Rate
E_{yy} (N.mm ²)	8.0E+09	1.1E+10	37.5%
E_{zz} (N.mm ²)	9.2E+10	2.9E+11	215.2%

Table 11. Comparison of the Reinforcement result and Target Value

Stiffness	Reinforcement Result	Target Value	Stiffness Margin
E_{yy} (N.mm ²)	1.1E+10	>9.2E+09	19.6%
E_{zz} (N.mm ²)	2.9E+11	>1.7E+11	70.6%

Table 10은 시험 결과를 통해 얻은 보강 전/후에 대한 굽힘 강성 증가율을 보여주고 있으며, Table 11은 시험을 통해 얻은 보강 후 굽힘 강성 값에 대한 목표 강성 만족 여부를 나타내고 있다. Table 11의 내용을 통해 보강 업무 수행 결과 BO-105 블레이드 플렉서 부분 굽힘 강성이 목표 강성 이상이 나옴을 확인 할 수 있다.

III. 결 론

BO-105 블레이드를 이용한 헬타워 시험 수행을 위해 BO-105 블레이드의 플렉서 부분에 대한 굽힘 강성 보강을 수행하였다. 플렉서의 굽힘강성 보강을 위해 기존 자료들을 통해 실제 블레이드의 굽힘 강성 값 및 단면 형상을 확인하였으며, 강성이 낮은 단면을 기준으로 강성 보강을 위한 해석을 수행하였다. 플렉서 단면의 강성 해석을 위해 단면 형상에 대한 FE 모델링을 수행하였으며, 유한요소 단면해석 프로그램을 이용해 단면 물성치 해석을 수행하였다.

굽힘 강성 보강을 위해서 플렉서 뒷전 영역에 폼을 적용하고 Carbon Fabric ±45°로 플렉서 영역과 뒷전 폼을 감쌌으로써 2차 관성 모멘트와 탄성계수를 증가시켰다. 보강형상에 대한 해석결과

는 목표 강성 대비 플랩 강성 60%, 래그 강성 35%의 강성여유를 나타내었다.

플렉서 보강 형상에 대한 해석결과를 토대로 굽힘 강성 보강을 수행하고 보강 전후 형상에 대한 굽힘 강성을 측정하여 해석결과와의 차이 및 목표 강성 만족 여부를 확인하였다. 강성 보강 이전 형상에 대한 시험 결과는 해석결과와 최대 5.77%, 최소 0.08%의 차이가 나는 것을 확인하였다. 그리고 강성 보강 형상에 대한 시험 결과는 해석결과와 최대 26.26%, 최소 -6.87%의 차이가 발생함을 확인하였으며, 두 결과 모두 목표 강성 값 이상이 나옴을 확인하였다.

보강 전후의 해석 결과와 측정 시험 결과를 비교하였을 때, 보강 후의 결과 차이가 보강 전의 결과 차이보다 상대적으로 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 실제 보강 작업에서 발생한 제작 오차로 인해 발생한 2차 관성 모멘트 값의 차이와 부분 큐어링 작업 과정에서 소재의 경화가 완벽하게 이루어지지 않음으로 인해 발생한 보강 소재의 탄성계수 저하에 따른 결과로 사료된다.

본 연구의 결과는 앞으로 연구 예정인 저진동/저소음을 위한 능동 작동기의 실물 블레이드 적용 시 활용할 예정이다.

후 기

본 논문은 한국항공우주연구원 주요사업 “소음저감을 위한 능동제어 로터 국제협력 연구”과제 결과 중 일부임.

References

- 1) Jackson, P., Munson, K. and Peacock, L., "Jane's All the World's Aircraft 2002~2003", 2002, pp 240~241
- 2) Kim, D. K., Yun, C. Y., Song, K. W., Kim, S. B., and Kim, S. H., "Current Technology Status of Bearingless Rotor Hub System for Helicopter", Current Industrial and Technologic Trends in Aerospace, Vol. 8, No. 1, Korea Aerospace Research Institute, 2010, pp. 118~130.
- 3) Warmbrodt, W. and Peterson, R. L., "Hover Test of a Full-scale Hingeless Rotor", Ames Research Center Moffett Field, CA 94035, 1984
- 4) Yun, C. Y., "KUH Main Rotor Whirl Test

Report", Korea Aerospace Research Institute, 2010. 2

5) Dixon, P., "Design, Development, and Flight Demonstration of the Loads and Stability Characteristics of a Bearingless Main Rotor", U.S. Army Research and Technology

Laboratories (AVRADCOM), 1980

6) Eurocopter(Deutschland GmbH) BO-105 Report

7) Cesnik, C. and Palacios, R., "UM/VABS Release 1.02 Theoretical Manual", Aerospace Dept - The University of Michigan, 2003