

# 무베어링 로터 휘타워 시험을 위한 무힌지 블레이드 강성보강에 따른 동특성 연구

## Dynamic Characteristic Study of Hingeless Blade Stiffness Reinforcement for Bearingless Rotor Whirl Tower Test

김태주† · 윤철용\* · 기영중\* · 김승호\* · 정성남\*\*

Taejoo Kim, Chulyong Yun, Youngjoong Kee, Seung-ho Kim and Sungnam Jung

**Key Words** : Whirl Tower Test(휘타워 시험), Bearingless Rotor(무베어링 로터), Hingeless Blade(무힌지형 블레이드) Stiffness Reinforcement(강성 보강).

### ABSTRACT

During helicopter rotor system development process, whirl tower test is conducted basically. For conducting whirl tower test during bearingless hub development process, design new blade or using existing blade with repair or remodeling. Because simple shape and efficient aerodynamic characteristic, BO-105 blade is used for hub system development widely. Originally BO-105 blade is used for hingeless hub, ho flap stiffness and lag stiffness on blade root area is relatively low. So applying BO-105 blade to bearingless hub whirl tower test, root area have to be reinforce. In this process, blade root area's section property will be changed. In this paper, suggest reinforcement method of BO-105 blade root area and study dynamic characteristic of bearingless rotor system with reinforcement BO-105 blade.

### 기 호 설 명

$E$  : 인장 계수

$G$  : 전단 계수

### 1. 서 론

현대 공학기술이 나날이 발전하면서 항공기 개발 기술 및 제작기술도 하루가 다르게 발전하고 있다. 항공기 분야의 기술 발전은 단순히 성능의 발전 뿐만 아니라 부품의 수명 증가 및 중량 감소, 그리고 정비성의 향상을 통해 운영유지를 위한 비용의 측면

에서도 많은 발전을 해 나아가고 있다.

헬리콥터는 로터 시스템을 통해 양력 및 조종력을 발생시키는 비행체로 여타 다른 항공기들과는 차별화된 수직이착륙 및 정지비행의 특성으로 인해 다양한 분야에서 활용되고 있다. 헬리콥터의 핵심 구성품 중 하나인 로터 시스템은 회전을 통해 양력을 발생시키는 블레이드를 동체와 연결시켜줌으로써 블레이드에서 발생하는 하중을 동체에 전달해 주는 역할을 하며, 이와 동시에 플랩(Flap), 리드래그(Lead-lag) 및 페더링(Feathering) 운동을 가능하게 하여 블레이드의 조종력을 전달해 주는 역할을 한다.

로터 시스템은 헬리콥터 개발 초기 2엽 블레이드 시소형태 로터(Sea-saw type Rotor)에서 시작하여 전관절형 로터(Articulated Rotor), 무힌지 로터(Hingeless Rotor)를 거쳐 무베어링 로터(Bearingless Rotor) 시스템으로 발전해 나아가고 있

† 교신저자; 정회원, 한국항공우주연구원 회전익기술팀  
E-mail : ktj@kari.re.kr

Tel : 042-860-2275, Fax : 042-870-3590

\* 한국항공우주연구원 회전익기술팀

\*\* 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

다. 본 논문에서는 무베어링 로터 개발과정에서 반드시 수행하여야 하는 헬타워 시험 수행을 위한 BO-105 블레이드 강성 보강 및 이에 따른 동특성 변화에 대한 내용을 기술하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 무베어링 로터 허브 개발

#### (1) 로터 시스템

로터 시스템은 블레이드가 플랩, 리드래그, 페더링 움직임을 동작할 수 있도록 3축에 대한 회전 움직임을 가능한 3가지의 힌지로 구성된다. 헬리콥터 개발 초기 적용되었던 전관절형 로터는 Figure 1과 같이 3개의 힌지가 모두 기계적으로 구현되었다. 이러한 전관절형 허브는 수많은 부품들로 구성되기 때문에 항공기 운영 중 정비에 많은 시간 및 비용이 소요되었으며, 구성품의 대부분을 금속재로 제작하여 중량 또한 매우 무거웠다. 이러한 허브의 단점을 보완하고자 3축에 대한 회전 움직임을 기계적 방법에서 물리적인 방법으로 전환하면서 부품 숫자 및 로터 시스템의 중량을 줄이게 되었다.

무힌지 허브는 기계적인 플랩 힌지와 래그 힌지를 없애고, 복합재를 사용한 플렉서(Flexure)라는 구성품의 물리적 변형을 통해 플랩 및 리드래그 움직임을 구현하였다. 이는 플렉서를 설계하면서 재료의 강성 특성과 단면 형상 조절을 통해 특정 위치에 대한 플랩 강성과 래그 강성을 조절하여 플렉서 상에 물리적인 플랩 힌지와 래그 힌지를 구현한 것이다. 그리고 여기에서 한발 더 나아간 무베어링 허브는 기계적인 피치 힌지마저 없애고 유연보(Flexbeam)와 토크 튜브(Torque tube)를 이용하여 3축 회전 움직임을 모두 물리적 변형을 통해 구현한 것이다. Figure 2, 3은

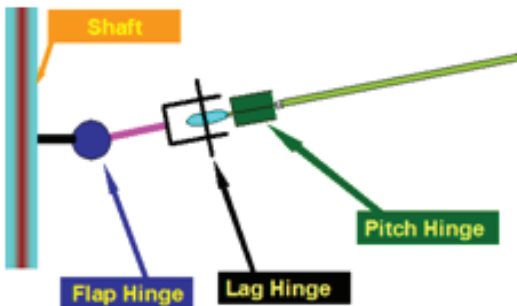


Figure 1. 전관절형 로터 허브의 일반적 구조

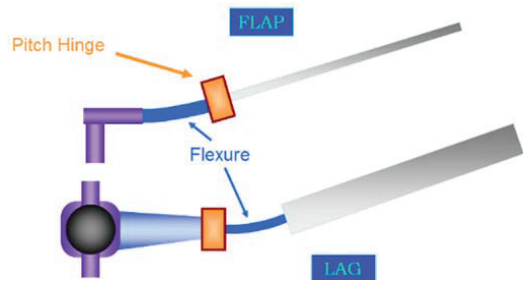


Figure 2. 무힌지 로터 허브의 일반적 구조

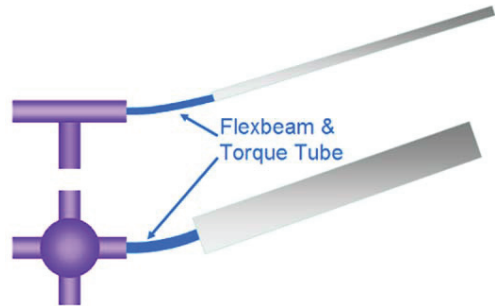


Figure 3. 무베어링 로터 허브의 일반적 구조

무힌지 허브와 무베어링 허브의 일반적인 구조를 나타내고 있다. 현재 한국항공우주연구원에서는 무베어링 로터 허브 개발 사업을 수행하고 있다.

#### (2) 헬타워 시험

헬리콥터 개발과정에서 로터 시스템을 개발하게 되면 헬타워 시험을 수행하게 된다. 헬타워 시험은 로터 시스템을 실제 비행 상태와 동일한 조건으로 회전시켜 로터 시스템의 트림을 잡아주고 안정성 및 성능을 확인한다. 헬타워를 통해 수행할 수 있는 시험은 로터 트래킹/발란싱 시험(Track and Balancing Test), 성능 시험(Performance Test), 동적 안정성 시험(Dynamic Stability Test) 등 3가지로 구분할 수 있다.<sup>(1)</sup>

현재 수행중인 무베어링 로터 허브 개발 사업에서는 실제 로터 시스템을 설계/제작한 후 헬타워 시험을 수행하게 된다. 그러나 본 사업에서는 로터 허브만 개발을 하며, 블레이드는 개발하지는 않기 때문에 기존의 블레이드를 개발 로터 허브에 맞도록 개조/보완하여 사용하기로 하였다. 현재 헬타워 시험을 위해서 BO-105 블레이드를 사용할 예정이다.

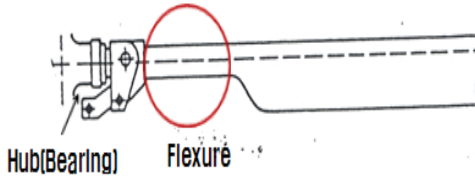


Figure 4. BO-105 로터 시스템

### (3) BO-105 블레이드

BO-105는 5,000 lbs급 4엽 헬리콥터로써 무한지형 허브 기술을 적용한 헬리콥터이다. BO-105 로터 시스템은 Figure 4와 같이 허브에 피칭 모션을 위한 베어링이 장착되어 있으며, 블레이드 루트 부분에 플랩과 리드래그 움직임을 구현해주는 플렉서가 위치하고 있다. 따라서 루트 부분의 플랩 방향과 리드래그 방향의 굽힘 강성이 매우 낮게 된다.

무한지형 허브의 특성을 가지고 있는 BO-105 블레이드를 무베어링 허브 시스템의 휠타워 시험에 사용하기 위해서는 플랩 힌지와 래그 힌지 역할을 해주는 블레이드 루트 부분의 강성을 높여주어야 한다. Table 1은 BO-105 블레이드 루트 영역에 요구되는 최소 강성을 보여주고 있다. 플랩 강성과 래그 강성의 최소 강성 기준은 블레이드 에어포일 영역의 강성을 기준으로 하였다.

## 2.2 BO-105 블레이드 루트 영역 강성 보강

### (1) 강성 보강 영역 설정

BO-105 블레이드의 루트 부분에 대한 강성 보강을 위해서는 우선 원래 강성이 얼마인지 확인하여야 한다. BO-105 블레이드 루트 부분의 강성특성은 참고문헌<sup>(2)</sup>을 통해 확인하였다. 본 자료에서는 BO-105 블레이드 루트 부분 중 두 단면에 대한 강성값이 제시되었으며, 제시된 강성 값을 Table 2에 나타내었다.

Table 1. BO-105 블레이드 루트 영역 목표 강성

Stiffness	Target Value
Flap Stiffness(N.mm <sup>2</sup> )	> 9E+09
Lag Stiffness(N.mm <sup>2</sup> )	> 2E+11

Table 2. BO-105 블레이드 루트 영역 강성 값

Stiffness	629mm Section	830mm Section
Flap Stiffness(N.mm <sup>2</sup> )	1.2E+10	8.9E+09
Lag Stiffness(N.mm <sup>2</sup> )	1.1E+11	9.2E+10

Table 2를 통해 나타난 강성 값을 살펴보면 629mm 단면보다 830mm 단면의 강성이 더 낮음을 알 수 있다. 따라서 강성이 낮은 830mm 부분의 강성 보강 결과가 목표값 이상이 나오면 다른 영역은 자연스럽게 목표값 이상의 강성이 나올 것으로 판단되므로 830mm 단면의 해석을 통해 강성 보강 방법을 결정하기로 하였다.

### (2) 강성 보강 방법 설정

BO-105 블레이드 강성 보강 방법은 보강 부위의 래그 강성 강화 효과를 위해 뒷전(Trailing Edge) 영역에 폼(Foam)을 적용하고 복합재인 Carbon Fabric ±45°으로 블레이드와 폼을 감싸서 강성을 보강하는 방법을 선정하였다. 이 때 전체 루트 영역의 공기역학적 형상 유지를 위해 뒷전 영역에 적용되는 폼의

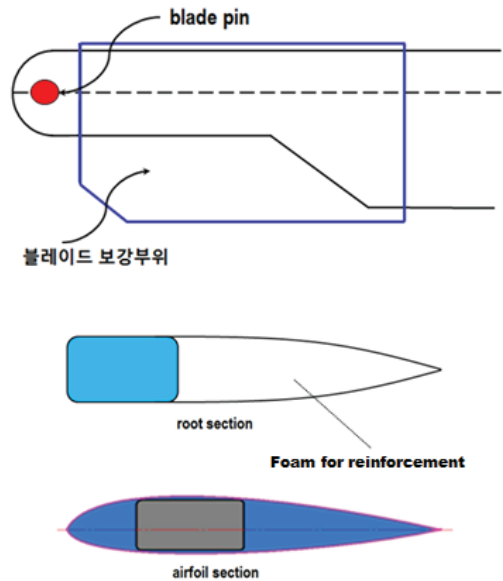


Figure 5. BO-105 블레이드 루트 영역 보강 방법

형상은 블레이드 영역의 뒷전 영역의 형상과 유사한 유선형상으로 하였다. 또한 BO-105 블레이드 루트의 뒷전 영역에 적용할 폼의 길이는 전체 코드(Chord) 길이가 블레이드 에어포일 영역의 코드 길이 270mm에 맞도록 설정하였다. 이러한 보강방법은 Figure 5에 나타내었다.

### 2.3 단면 물리량 해석

(1) 단면 물리량 해석을 위한 모델링 설정

BO-105 블레이드 루트 830mm 단면의 강성 보강을 위한 복합재 두께를 결정하기 위해 단면 형상에 대한 모델링을 수행하고, 각각의 부위에 대한 재료 특성을 적용하여 단면물리량을 계산하였다. 다음의 Figure 6은 BO-105 블레이드 루트 830mm 단면의 형상을 나타내고 있다. Figure 6의 단면 형상을 Figure 7과 같이 단순화 모델링 하고 Table 3의 재료 특성을 적용하여 굽힘 강성을 계산하여 실제 물성치 값과 비교하였다. 이 때 인장 강성 및 굽힘 강성의 계산에는 유효요소 해법을 사용하는 단면물성치 해석 In-house 프로그램을 사용하였다. Table 4의 해석결과에 따르면 실제 데이터와 해석결과와의 오차가 최대 5.6%가 나옴을 확인할 수 있다.

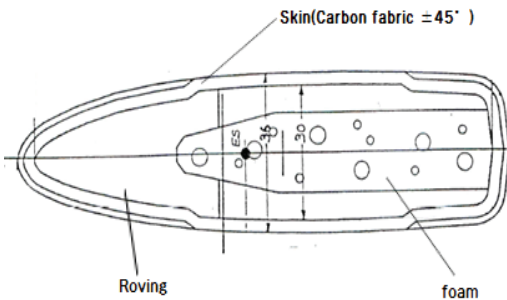


Figure 6. BO-105 블레이드 루트 단면 - 830mm

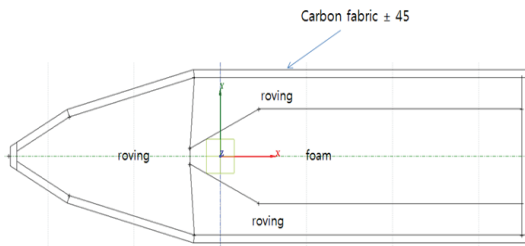


Figure 7. BO-105 블레이드 루트 830mm 단면 모델링

Table 3. BO-105 블레이드 루트 재료 특성

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

Table 4. BO-105 블레이드 루트 굽힘강성 해석결과 비교

Stiffness	Result		Error
	Original	Analysis	
Flap Stiffness(N.mm <sup>2</sup> )	8.9E+09	8.4E+09	5.6%
Lag Stiffness(N.mm <sup>2</sup> )	9.2E+10	9.2E+10	0.8%

(2) 보강재를 적용한 모델의 단면 물리량 해석

본 연구의 목적은 특정값의 강성을 도출하는 것이 아니라 특정수준 이상의 강성이 나오도록 보강 방법을 결정하는 것이므로 플랩 굽힘 강성 해석결과에서 나온 5.6% 오차를 감안하고 단순화 모델링 형상을 사용하였다.

강성 보강을 위한 Carbon Fabric ±45°의 두께는 1mm와 1.6mm를 적용하였으며, 각 형상에 대한 단면 물리량 해석을 수행하여 플랩 굽힘 강성 및 래그 굽힘 강성을 도출하였다. Figure 8은 보강형상 모델링을 보여주고 있으며 Table 5는 해석결과를 나타내고 있다.

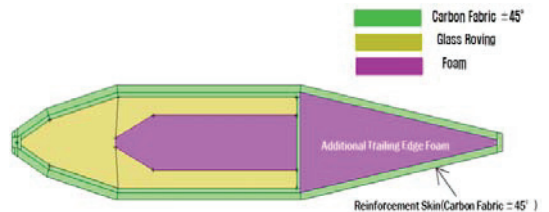


Figure 8. BO-105 블레이드 루트 보강형상 모델링

Table 5. BO-105 블레이드 루트 보강 후 굽힘강성 해석결과

Stiffness	Result	
	1mm	1.6mm
	Reinforcement	Reinforcement
Flap Stiffness(N.mm <sup>2</sup> )	1.3E+10	1.4E+10
Lag Stiffness(N.mm <sup>2</sup> )	2.2E+11	2.7E+11

Table 5의 결과를 Table 1의 목표 강성값과 비교해 볼 경우 플랩 강성은 Carbon Fabric ±45°1mm 보강시 목표 강성 대비 49%의 강성 여유를 가지게 되며, 1.6mm 보강 시 60%의 강성 여유를 가지게 된다. 또한 래그 강성의 경우 1mm 보강 시 목표 강성 대비 10%의 강성 여유를 가지게 되며, 1.6mm 보강 시 35%의 강성 여유를 가짐을 확인하였다.

그리고 강성보강에 따른 보강영역의 무게중심(Center of Gravity), 인장 중심(Tension Center), 전단중심을 계산하여 Table 6에 나타내었다. 가로축을 x, 세로축을 y로 하여 영점(Zero point)은 보강 전 모델의 무게중심으로 하였다. x 방향의 변위에 대해서는 뒷전 방향의 변위를 +로 하였으며, y 방향으로는 대칭의 형상이므로 모든 중심이 0로 계산되었다. 해석 결과 전체적인 중심은 뒷전 방향으로 이동하였으며, 특히 무게 중심이 많이 이동하였음을 확인하였다. 강성보강을 1mm 하였을 경우 4.7%, 1.6mm 강성보강을 하였을 경우 6.2%의 무게중심이 이동하였음을 확인하였다.

Table 6. BO-105 블레이드 루트 단면물리량 해석결과 비교

Section Offset	Result (x axis)		
	Original	1mm Section	1.6mm Section
Center of Gravity	0.0mm	12.7mm	16.8mm
Tension Center	-1.5mm	3.3mm	5.9mm
Shear Center	2.1mm	6.8mm	8.4mm

## 2.4 동특성 해석

강성 보강에 따른 무게중심의 변화는 블레이드의 동특성에 영향을 주게 된다. 따라서 BO-105 블레이드 루트 강성 보강에 따른 로터 시스템 동특성 변화를 해석하여 비교하였다. 1.6mm를 보강한 경우, 플렉서부분에서 플랩강성은 1.57배, 래그 강성은 2.93배 증가하였으며, Table 6과 같이 무게 중심 및 전단 중심은 뒷전 방향으로 이동하였다. Table 7은 로터 회전수 349RPM 및 콜렉티브 피치각 7도 조건에 대해 현재 개발중인 무베어링 허브에 원래 BO-105블레이드를 장착한 경우와 강성이 보강된 BO-105블레이드를 장착한 경우에 대해 회전고유진동수를 비교하였다. 래그 모드는 2차까지, 플랩모드는 4차까지 비교하였으며, 피치모드는 1차까지 비교하였다. 래그 모드의 경우는 무베어링 허브 유연보의 래그 방향 강성이 낮아 보강을 하였을 경우 약간의 고유진동수 상승을 보였다. 또한 1차 피치 모드 및 3차, 4차 플랩 모드의 고유진동수가 약간 상승하였으나, 전반적으로 미비한 수준이다.

Figure 9는 로터 회전속도에 따른 고유진동수를 나타낸 Fan-plot이다. 점선은 보강전의 BO-105블레이드 모드이며, 적색 실선은 보강후 블레이드의 모드이다. 청색 쇄선은 로터 회전수에 해당하는 n/rev이다. 이 결과에서도 보강으로 인한 고유진동수의 변화는 미비하였으며, 운용회전수 349RPM에서 1차 피치모드와 3차 플랩모드가 4/rev근처에 있어 과도한 진동이 유발될 수 있으므로, 블레이드 또는 허브에 일부 튜닝이 필요함을 확인하였다.

Table 7 보강 전 및 보강 후 고유진동수 비교

Modes	BO-105 blade	Reinforced BO-105 Blade
	Frequency, /rev(Hz)	Frequency, /rev(Hz)
1st Lag Mode	0.66(3.88)	0.70(4.07)
1st Flap Mode	1.04(6.03)	1.04(6.03)
2nd Flap Mode	2.52(14.68)	2.53(14.71)
1st Torsion Mode	3.93(22.85)	3.98(23.13)
3rd Flap Mode	4.13(24.01)	4.18(24.30)
2nd Lag Mode	4.61(26.82)	4.61(26.79)
4th Flap Mode	6.44(37.43)	6.54(38.05)

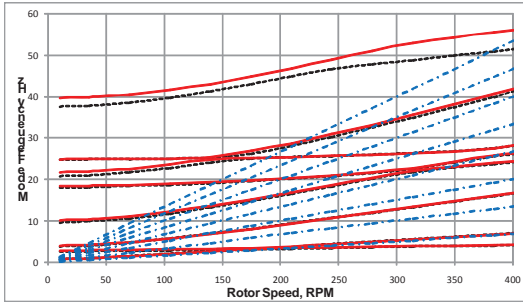


Figure 9 회전속도에 따른 회전고유진동수

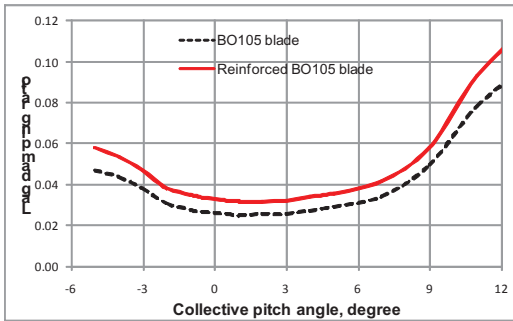


Figure 10 래그 모드 안정성

그리고 마지막으로 보강하지 않은 BO-105블레이드와 보강된 BO-105블레이드에 대한 래그 모드 감쇄를 계산하여 비교하였다. Figure 10는 일괄 피치각에 따른 래그 감쇄를 보여주고 있다. 보강된 블레이드의 감쇄는 보강전 블레이드에 비해 각 피치각에 대해 최소 0.6%이상의 증가를 나타내고 있다. 이는 래그 모드 고유진동수의 증가로 인해 감쇄가 증가한 것으로 판단된다. 또한, 두 경우의 추력의 차이는 거의 없는 것으로 확인하였다.

### 3. 결 론

현재 개발중인 무베어링 로터의 휠타워 시험을 위한 BO-105 블레이드 루트 영역 강성 보강 해석 및 동특성 해석을 수행하였다. 기존 자료를 통해 BO-105 블레이드 루트 영역의 강성 값을 확인하였으며, 강성이 가장 낮은 영역을 기준으로 강성 보강을 수행하였다. BO-105 블레이드 강성 해석을 위해 FE 모델링을 수행하여 In-house 코드를 이용하여

단면 물리량 해석을 수행하였으며 해석결과 실제 강성값과 유사함을 확인하였다. 그리고 폼과 Carbon Fabric  $\pm 45^\circ$ 를 적용하여 강성을 보강하는 방법을 제시하였고, 강성 보강 형상에 대한 단면 물리량을 해석하여 목표강성 대비 플랩 강성 60%, 래그 강성 35%의 강성 여유를 가짐을 확인하였다. 또한 강성 보강에 따른 단면의 무게중심이 뒷전으로 움직임을 확인하였으며 무게중심 이동에 따른 로터시스템 동특성 변화를 해석하여 그 영향성이 미미함을 확인하였다. 추후 BO-105 블레이드의 기본물리량 시험을 통해 강성 보강 전후의 실제 단면물리량 값을 확보하여 동특성 해석을 수행한 후 무베어링 허브 휠타워 시험에 BO-105 블레이드를 적용할 예정이다.

### 후 기

본 논문은 지식경제 기술혁신사업(항공우주부품 기술개발사업) 무베어링 로터 허브시스템 개발사업의 연구결과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) KUH 주로터 휠시험 보고서, 한국항공우주연구원, 2010. 2
- (2) Eurocopter BO-105 Report