

# 헬리콥터 무베어링 로터 허브시스템의 개념 연구

## A Conceptual Study on the Bearingless Rotor Hub System of Helicopter

김덕관† · 김민환\* · 윤철용\* · 김태주\* · 김승호\*

Deog-Kwan Kim, Min-Hwan Kim, Chul Yong Yun, Taejoo Kim and Seungho Kim

Key Words : Bearingless Rotor Hub System(무베어링 로터 허브 시스템), 유연보(Flexbeam), 토크 튜브(Torque Tube), 탄성체 댐퍼(Elastomeric Damper), Helicopter(헬리콥터), 정비성(Maintenance)

### ABSTRACT

In this paper, it was described the current technology status of bearingless rotor hub system for helicopter which is one of major rotor hub system. Also, a conceptual study on the new bearingless rotor hub system of helicopter was described. First, the advantages and disadvantages of major helicopter rotor hub system are described in comparison to each other types of rotor hub system. The unique characteristics of bearingless rotor hub system are described compared to other types of rotor hub systems. Next, the main function, role and characteristics of the sub-components of bearingless rotor hub system are described. Recent helicopters which adopt this bearingless rotor hub system are described and introduced. This conceptual study shows that double-H sectional construction and rectangular construction of flexbeam are the most effective candidates of this new bearingless rotor system. This bearingless rotor hub system can be used for 7,000lbs class helicopter. Now, a further trade-off study will show

### 1. 서 론

헬리콥터 로터시스템은 로터 허브/조종으로부터 회전력과 피치 조종력을 전달받아 헬리콥터에 양력, 추력 및 기동력을 발생시키는 로터 블레이드(rotor blade), 로터 블레이드에서 발생된 추력(thrust) 및 모멘트(moment)를 감당하고, 비행에 필요한 힘을 동체에 전달하는 로터 허브 시스템(rotor hub system), 헬리콥터의 추력 및 조종력을 제어하는 로터 조종시스템(rotor control system)으로 구성되며, 엔진 및 동력전달장치와 함께 헬리콥터 비행을 가능하게 하는 핵심 구성품이다. 헬리콥터 로터 허브 시스템은 로터 블레이드의 여러 가지 운동을 가능하게 하고 이러한 운동으로부터 생기는 변형 및 하중 등을 감당하게 된다. 로터 블레이드가 회전하면서 공기력에 의해 생기는 대표적 인 운동은 회전면 상하로 운동하는 플랩 운동(flapping motion), 회전면 전후로 운동하는 리드-래그 운동 (lead-lag motion), 블레이드 피치각 방향으로 운동하는 피칭 운동(pitching motion 또는 페더링 운동 feathering motion)이다. Figure 1에 이러한 운동을 도식화하여 제시하였다.

헬리콥터 로터 허브 시스템은 이러한 힌지의 형태 및 유무에 따라 시이소오형(see-saw 또는 티터링 teetering), 관절형(articulated), 무힌지형(hingeless), 무베어링형(bearingless) 4가지 형태로 구분되어진다. Table 1에 이러한 힌지 허브 종류에 따른 특징 및 장단점을 요약하여 정리하였다.

Table 1에 이러한 힌지 허브 종류에 따른 특징 및 장단점을 요약하여 정리하였다.

† 교신저자; 정희원, 한국항공우주연구원  
E-mail : shine@kari.re.kr  
Tel : 042-860-2327, Fax : 042-870-3590  
\* 한국항공우주연구원

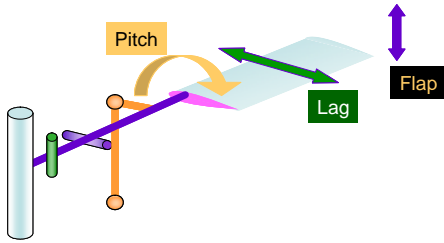



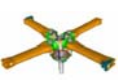


Figure 1. Three motions of Rotor Blade

**Table 1** Characteristics of Rotor Hub System

| Hub Type         | Features  | Helicopters                         | Pictures  |
|------------------|---|-------------------------------------|---|
| sea-saw type     | 2-blades<br>Simple<br>Light weight<br>Light helicopter              | R44<br>Bell 206<br>UH-1H<br>AH-1S   |    |
| articulated type | 4,5,6-blades<br>Complex<br>High cost, heavy<br>Heavy helicopter     | UH-60<br>EH-101<br>NH-90<br>EC-725  |    |
| hingeless type   | 3,4-blades<br>Simple<br>Low cost, Light weight<br>medium helicopter | Lynx<br>Bell 412<br>BO 105<br>Tiger |   |
| bearingless type | 3,4-blades<br>Simple<br>Low cost, Light weight<br>medium helicopter | EC135<br>MD900<br>RAH-66<br>AH-1Z   |  |

시이소오형 허브는 2개 블레이드를 적용하는 소형 헬리콥터에 주로 적용하는 허브 형태로 플랩, 페더링 운동에 대한 2개의 힌지를 갖고 있어 비교적 단순한 허브 구조이다. 관절형 허브는 플랩, 리드-래그, 페더링 운동에 대한 3개의 힌지를 모두 갖고 있어 복잡하고, 부품수도 많으며, 큰 중량으로 운용 유지비용이 많이 소요된다. 무힌지형 허브는 플랩 및 리드-래그 운동을 위한 2개 힌지를 블레이드 구조적 유연체(flexure)로 대체하여 오직 페더링(피치) 힌지 1개만 존재하며, 비교적 단순한 구조에 저중량, 적은 부품수, 저 운용유지비용이 든다. 무베어링

형 허브는 첨단형 로터 허브로서, 플랩, 리드-래그 및 페더링 운동을 위한 3개 힌지를 모두 제거하고, 구조적 유연보(flexbeam)로 대체되어 가장 구조가 단순하며, 가장 적은 부품수로 운용유지비용이 최적으로 소요된다.

## 2. 무베어링 로터 허브시스템 개념 연구

### 2.1 무베어링 허브 주요 구성품

#### (1) 유연보 (Flexbeam)

무베어링형 허브의 유연보는 기존 허브 형태의 플랩 운동(flapping motion), 리드-래그 운동(lead-lag motion) 및 페더링 운동(feathering motion, 또는 pitching motion)을 복합재로 최적화 설계를 통해 구조물 자체에서 구현하는 것이다.

무베어링형 허브의 유연보는 로터 블레이드에서 발생하는 추력 및 굽힘 하중, 원심력 등을 감당하는 핵심 부품으로 설계시 구조강도 확보, 안전한 피로 수명 확보 및 3개 운동에 대한 구조적 최적화 등을 모두 고려하여 설계되어야 한다. 따라서 필연적으로 복합재료를 적용하여 설계되며, 굽힘 하중 및 원심 하중에는 강하게 견디어야 하면서, 동시에 피치각 변동시에는 유연해야 하는 복잡한 구조이다.

플랩 운동은 로터 블레이드가 회전하면서 새가 날개 짓(Flapping)을 하듯이 위아래 움직이는 운동을 일컫는데, 이를 위해서는 플랩 운동 방향의 강성(stiffness)을 상대적으로 작게 설계한다. Figure 2에서 단면 A-A에 해당하는 부분이 플랩 운동을 주로 일으키는 부분이다.

리드-래그 운동은 로터 블레이드가 회전하면서 회전면내에서(in-plane) 회전방향 앞뒤로 움직이는 운동을 일컫는데, 이를 위해서는 리드-래그 방향의 강성(stiffness)을 상대적으로 작게 설계한다. Figure 2에서 단면 B-B에 해당하는 부분이 리드-래그 운동을 주로 일으키는 부분이다.

페더링 운동 (또는 피치 운동)은 로터 블레이드가 회전하면서 추력을 증가시키거나 방향을 바꿀 때 로터 블레이드 피치각을 변경시킴으로서 생기는 운동을 일컫는데, 이를 위해서는 페더링 방향의 강성(stiffness)을 작게 설계한다. Figure 2에서 단면 B-B에 해당하는 부분으로 단면 형상에 따라 페더링 운동에 효율성이 좌우된다.

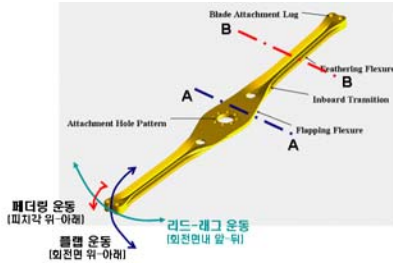


Figure 2. Motions of Flexbeam

### (2) 토크 튜브 (Torque Tube)

복합재료를 적용하여 비틀림 방향으로 피치각을 변동시키면서 굽힘 하중에는 유연해야 하고, 내부에는 유연보를 포함하는 토크 튜브는 피치 링크와 연결되어 로터 블레이드의 피치각을 조절한다.

최첨단 복합재료를 적용하는 토크 튜브는 비틀림 (torsion) 방향으로는 강성이 커야 하며, 굽힘 (bending) 방향으로는 상대적으로 유연해야 하며, 유연보와 함께 무베어링 로터 허브의 핵심 부품이다. Figure 3에 대표적인 토크 튜브 형상 및 시제품이 제시되었다. 복합재료 중 탄소섬유를 주로 많이 사용하여 토션 방향의 강성을 강하게 부여해주는 것이 일반적이다.



Figure 3. Prototype of Torque Tube ( Kaman)

### (3) 탄성체 댐퍼 (Elastomeric Damper)

로터 블레이드가 회전하면서 피치각 변동에 따라 플랩핑 운동 및 리드-래그 운동이 생기는데, 과도한 리드-래그 운동은 로터 무게중심 위치를 변동시키면서 헬리콥터를 공력탄성학적으로 불안정(지상공진, 비행공진)하게 만들 수 있으므로 리드-래그 댐퍼를 달아 이를 방지한다.

로터 허브시스템의 리드-래그 댐퍼는 이러한 과도한 리드-래그 운동으로 인한 로터 무게중심의 불균형 현상을 방지하게 위해 로터 허브에 장착하게 된다.

### (4) 허브 판 (Hub Plate)

허브 판(Hub Plate)은 일반적으로 금속재료로 만들어지는 것이 대부분이며, 로터 회전축 개념에 따라 회전축(Rotor Mast or Rotor Shaft)과 일체형이거나 또는 분리형으로 나뉘게 되고, 로터 원심력 및 굽힘 하중을 최종적으로 감당하는 부품이다. 따라서 회전축 개념에 따라 로터 마스트에 포함되기도 하고, 허브 시스템에 포함되기도 한다.

## 2.2 초기 무베어링 허브시스템 개념

최초의 성공적인 무베어링 로터 허브 시스템은 미국의 UTTAS 경쟁을 통해 나오게 되었다<sup>(1)</sup>. 시콜스키(Sikorsky)사와 보잉-버틀(Boeing Vertol)사는 꼬리 로터용 면내 강성(stiff inplane) 무베어링 로터 허브를 개발하였다. 이러한 무베어링 로터 허브의 도입은 이후 다른 회사(MBB 또는 Hughes)등에도 유사한 시제품이 개발되는데 영향을 주었다.

헬리콥터 주로터용 무베어링 로터 허브 시스템은 1978년 보잉-버틀사에서 BO 105 헬리콥터용으로 개발되면서 적용되기 시작하였다. 이 무베어링 로터 허브(Figure 4)는 기본 모델로 인식되어 이후 개발되는 무베어링 허브에 영향을 끼쳤다. 허브의 조종력을 블레이드 피치각 조절로 전달하는 것이 중요 문제이었는데, 1978년에 이러한 문제점이 비행시험하면서 발생하였는데 이후 개발되는 무베어링 로터 허브에서는 유연보는 토크 튜브로 감싸는 것으로 해결하였다.

벨(Bell)사는 Bell 680용 무베어링 로터 허브 시스템(Figure 5)을 개발하여 1982년 5월에 첫 비행을 실시하였다. 이 무베어링 로터 허브는 단일 유리섬유 구조물이 4개 블레이드와 장착되는 유연보를 형성하도록 구성되었다. 토크 튜브는 이러한 일체형 유연보 구조물을 각각 감싸고 있으며 피치각 변화를 가능하게 한다. 리드-래그 댐퍼가 장착되는 위치에 탄성체 베어링을 넣어 허브와 연결되도록 되어 있다.

MBB(현 Eurocopter 독일)사는 1984년에 독자적인 기술시현용 무베어링 로터 허브 시스템을 개발하여 비행하였다. 무베어링 로터 허브의 설계 개념은 보잉-버틀(Boeing Vertol)사의 무베어링 로터 허브 개념과 유사하게 T-형상 유연보와 유연보 옆에 토크 튜브를 갖고 있다. 2번째 기술시현 시제품은 1986

년에 비행하였으며 리드-래그 댐퍼를 토크 튜브와 블레이드 루트(root)부에 장착하여 비행시와 지상 운용시 불안정성을 제거하였다. 이 모델은 현재 EC-135 헬리콥터에 적용되고 있다.

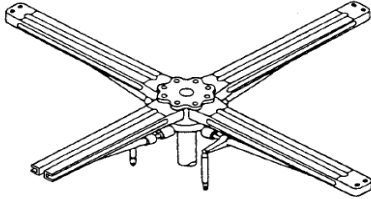


Figure 4. Boeing-Vertol for BO 105

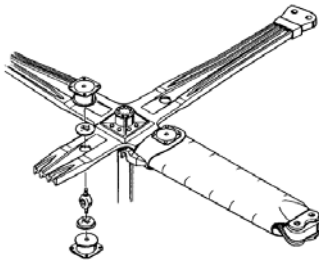


Figure 5. Bell 680

### 2.3 무베어링 로터 허브시스템

대부분의 무베어링 로터 허브 시스템이 적용된 최신 헬리콥터는 중소형 헬리콥터가 대부분이다. 본 절에서는 현재 무베어링 로터 허브 시스템을 장착하여 운용되고 있는 최신의 헬리콥터를 중심으로 무베어링 허브 시스템의 기술을 소개하고자 한다.

#### (1) MD 900(Explorer) 헬리콥터

미국 맥도널드-더글러스(현 보잉)사는 1994년에 무베어링 로터 허브 시스템을 장착한 MD 900 헬리콥터를 개발하였다. 무베어링 로터 허브 시스템의 특징은 분리형 허브판을 갖고 있으며, 유연보 범퍼와 센터링 베어링을 갖고 있는 것이 특징이다. 최근에는 MD 902 업그레이드 버전이 출시되었다.

#### (2) EC 135 헬리콥터

독일 유로콥터사는 1980년대 중반 BO 108 헬리콥터용 무베어링 로터 허브 시스템을 개발하기 시작

하였으며, 1988년 10월에 첫 비행시험을 수행하였다<sup>(2)</sup>. 이후 1991년에 2번째 시험을 수행하였으며, 1994년에 꼬리로터에 Fenestron을 장착하여 3번째 시험을 수행하였다. EC 135는 최대이륙중량 6,415파운드 급으로 무베어링 로터 허브 시스템의 특징은 분리형 허브판을 갖고 있으며, 유연보 단면이 +자 형상을 갖고 있으며, 유리섬유 로빙으로 제작되었다.

#### (3) AH-1Z Viper 헬리콥터

미국 벨사는 AH-1 코브라 공격헬기의 대체헬기를 개발하는 H-1 upgrade 프로그램을 통해서 주로터 시스템으로 무베어링 로터 허브 시스템을 적용하였다. AH-1H의 대체헬기인 AH-1Y와 부품공용성을 극대화하여 로터 및 구동계통, 엔진 등을 공유하여 사용한다. 1996년 개발 착수하여 2003년까지 개발단계를 거쳤으며, 2008년에 양산하기 시작하였다. 비교적 큰 중량급에 적용된 무베어링 로터 허브 시스템으로서 최대이륙중량 18,500파운드 급이다. 무베어링 로터 허브 시스템의 특징은 2개 유연보를 일체형으로 사용하여 4개 블레이드에 2개 유연보를 적용하였으며, 분리형 허브 판을 갖고 있고 유연보 단면이 X자 형상을 갖고 있으며, 유리섬유 로빙으로 제작되었다.

#### (4) Kazan Ansat 헬리콥터

러시아 카잔 헬리콥터사<sup>(3)</sup>는 1993년 Ansat 헬리콥터를 개발하면서 무베어링 로터 허브 시스템을 장착하였다. 무베어링 로터 허브 시스템으로서 최대이륙중량 7,725파운드 급이다. 무베어링 로터 허브 시스템의 특징은 AH-1Z와 같이 유연보 2개로 4개 블레이드를 장착하는 일체형 개념이다. Figure 6에는 Kazan Ansat 헬리콥터 무베어링 로터 허브 시스템이 제시되었다.

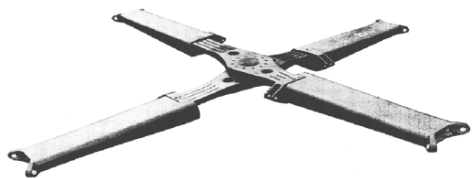


Figure 6. Bearingless Main Rotor Hub (Kazan Ansat)

## 2.4 무베어링 허브시스템 개념연구 결과

### (1) 유연보 허브 체결 형태

무베어링 허브 시스템의 장점인 부품수 감소 등의 효과를 보기 위해 기존 유연보 허브 체결 형태를 분석하였으며, 크게 2가지로 구분된다. 하나는 유연보와 허브가 각각 분리되어 체결되는 방식이다. 이 형태는 블레이드마다 각자의 유연보가 있고, 유연보는 허브판에 각각 별도로 체결된다. 2.3절에서 언급한 MD사의 MD900 또는 Eurocopter사의 EC 135 헬리콥터가 대표적인 사례이다. 또 다른 하나는 유연보가 십자 교차 체결 형태(Crucial Cross-Strap Type)이다. 2.3절에서 언급한 Bell사의 AH-1Y 또는 Kazan사의 Ansat 헬리콥터가 대표적으로 이 허브 체결형태에 속한다. 부품수 감소 효과를 보기 위해 2가지 개념을 적용한 허브의 개념을 연구하였으며, 아래 Table 2에 제시되었다.

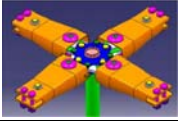

### (2) 블레이드 체결 형태

무베어링 허브시스템과 블레이드의 체결 형태에는 2가지 방법이 존재한다. 기존의 일반적인 형태로 허브시스템과 블레이드가 분리되어 체결되는 방식으로 가장 보편적인 방법이다. 다른 방법은 무베어링 허브의 유연보 및 토크 튜브를 블레이드와 일체가 되도록 하는 형태이다. 이는 블레이드와 허브 부품이 일체가 됨으로써 부품수 감소, 중량 감소 등의 효과를 극대화시킬 수 있는 장점이 있으며, 대표적인 적용 헬리콥터로는 유로콥터사의 EC135 헬리콥터이다. Figure 7에 일체형의 예를 제시하였다. 본 연구에서는 허브시스템 자체를 개발하는 것이 목적으로 블레이드는 기존 블레이드(BO-105)를 활용해야 하기 때문에 가장 보편적 방법인 분리형 체결 형태로 접근하였다.

### (3) 유연보 단면 형상

무베어링 허브시스템의 핵심 요소인 유연보의 형상은 현재 3가지 형태를 비교하여 개념연구를 하였다. 직사각형 단면 구조는 단순하여 제작성 용이 등의 장점이 존재하지만 단면강성(플랩, 래그, 토션)등을 최적화하는데 한계가 존재하는 단점이 있다. 이중 C-채널 단면 형상은 복잡하여 제작성 난이도가

Table 2 Hub System

| Type                | Parts No. & Weights               | Pictures   |
|---------------------|-----------------------------------|--|
| Separate            | Parts : 224 EA<br>Weight : 82.9kg |  |
| Crucial Cross-Strap | Parts : 184 EA<br>Weight : 81.5kg |  |

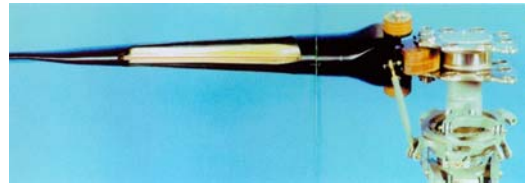


Figure 7. Example of unified Blade (EC 135)

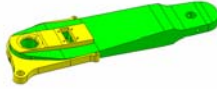

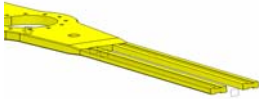
높지만 상대적으로 플랩 및 래그 강성 대비 낮은 토션 강성 확보 효과가 뛰어난 장점이 있다.

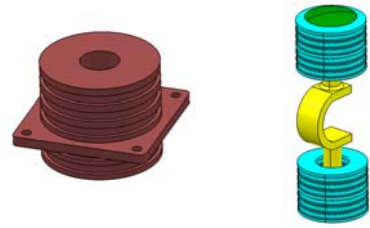
이중 H-채널도 C-채널과 유사하지만 토션 강성을 적절하게 확보할 수 있는 장점이 있고, C-채널 대비 구조적으로 안정하지만 제작성 난이도는 증가하게 된다. 현재 단면형상에 대한 상세 해석이 진행중이며, 단면물리량 해석 결과 및 동특성 해석 결과를 통해 최종 형상을 확정할 계획이다. Table 3에는 현재 개념연구 수행중인 유연보 단면 형태별 장단점 및 대표적 형상이 제시되었다.

### (4) 토크 튜브 형태

토크 튜브는 무베어링 허브시스템의 유연보를 감싸고 피치 링크의 하중을 전달하여 블레이드 피치각을 변화시키는 기능을 갖고 있다. 또한 공기역학적 항력을 최소화하여 헬리콥터 진전 비행시 성능 향상에 기여하는 역할을 하기 때문에 저항력 형상을 갖추어야 한다. 이러한 요구조건으로 토크 튜브는 타원형 구조를 갖추는 것이 일반적이며, 본 연구에서는 개념 연구된 유연보의 구조를 감싸면서 피치각을 변화시킬 수 있는 구조로 진행되었으며, 공력형상도 저항력 요구조건을 만족하도록 타원형 형상을 선택하였다. 또한 중량 감소 및 강성 증대를 위해 탄소 섬유 계열을 적용하였다. 현재 개념연구가 진행되고 있는 대표적인 허브 형태별 토크 튜브가 Figure 8에 제시되었다.

**Table 3** Flexbeam Configuration

| Section Type  | Advantages                         | Configuration   |
|---------------|------------------------------------|---|
| Solid         | -Simple<br>-Difficult Optimization |  |
| Double C type | -Complex<br>-Easy Optimization     |  |
| Double H type | -Complex<br>-Easy Optimization     |  |



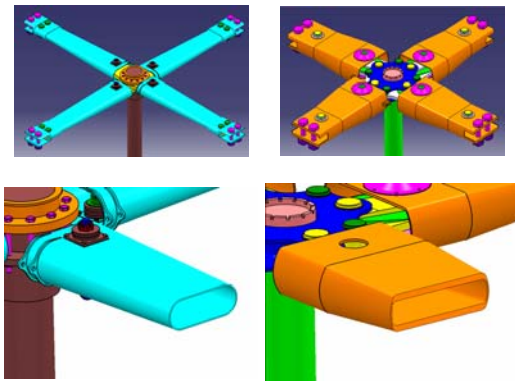
Crucial Cross Type Hub      Separate Type Hub  
Figure 9. Torque Tube Configuration

### 3. 결 론

본 연구를 통해서 무베어링 허브시스템 개발에 필요한 기술적 사항 및 해외 사례 분석을 통해 적용 가능한 기술들을 파악하였다. 또한 개념연구를 통해 무베어링 허브시스템의 핵심부품들에 대한 기능 및 역할, 부품수 및 중량 등을 추정하였으며, 본 논문에서는 분리형 및 교차형 2가지 허브시스템에 대한 개념연구 결과를 제시하였다. 향후 기본설계를 통해 해석과 연계하여 구체화할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 항공우주부품기술개발사업 연구결과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.



Crucial Cross Type Hub      Separate Type Hub  
Figure 8. Torque Tube Configuration

#### (5) 탄성체 댐퍼 형태

탄성체 댐퍼는 무베어링 허브시스템의 동특성에 영향을 미치며, 안정성 확보를 위해 적절한 방법으로 적용되어야 한다. 현재 분리형 및 교차형 허브 형태에 따라 2가지 방식의 댐퍼 형태가 검토되었다. 교차형 허브의 경우 토크튜브 상하에 연결되는 구조로 토크 튜브의 리드-래그 운동에 의해 면내 감쇠 효과를 낸다. 분리형 허브의 경우 댐퍼 형상 자체는 유사하지만 토크 튜브 체결 방식이 유연보에 피벗(pivot)형태로 체결되는 형태면에서 차이가 난다. 댐퍼의 상세 형상 및 사양은 동특성 해석을 통해 계산된 댐핑값을 기준으로 댐퍼 전문업체에 의뢰하여 최종 확정해야 한다. 그전까지 인터페이스 요구도 등을 확정할 예정이다. Figure 9에 현재 검토 중인 댐퍼 형태가 제시되었다.

### 참 고 문 헌

- (1) Rotorcraft Design for Operations, AGARD-CP-423, 1986
- (2) P. Konstranzer, et all, "Recent advances in Eurocopter passive and active vibration control", American Helicopter Society 64th Annual Forum, Montréal, Canada, April 29 - May 1, 2008
- (3) S. M. Bastrakov, et. all, " Methodology to Provide Strength and Service Life of Composite Hingeless Rotor Elastic Elements, the 33th European Rotorcraft Forum, 2007