

# 헬기 로터시스템 진동 제어를 위한 신기술 동향

## - TEF (Trailing Edge Flap) 중심으로 -

글 / 김덕관, 김도형, 홍단비, 기영중, 이제동, 김승호 shine@kari.re.kr

한국항공우주연구원 항공사업단 항공기술실 로터그룹

### 초 록

헬기는 비행에 필요한 추력, 모멘트 및 조종력을 회전하는 로터시스템에서 발생시키기 때문에 근본적으로 진동이 많이 생기는 항공기이다. 로터시스템의 회전에 의해 발생하는 진동소스를 제어함으로써 헬기 동체에 전달되는 진동을 감소시키고자 하는 연구들이 지금까지 수많이 진행되었다. 이러한 연구들을 크게 두 가지로 분류하면, 수동적 진동제어 방법과 능동적 진동제어 방법으로 나눌 수 있다. 수동적 진동제어 방법은 그간 오랫동안 연구되어 현재 운용 헬기에 실제적으로 적용되고 있으나 능동적 진동제어 방법은 최근까지 활발한 연구가 진행되고 있는 상태이다. 본 논문의 서론에서는 헬기 진동제어를 위한 일반적인 방법에 대한 개요를 소개하였다. 본문은 로터시스템 진동제어 기술 중 최근까지 연구가 진행되고 있는 능동적 진동제어 방법을 중심으로 기술하였다. 특히 최근 비행시험에 성공하여 거의 실용화 단계에 이르고 있는 PZT를 이용한 Trailing Edge Flap 기술, Active Twist Rotor 등을 중점적으로 소개하였다. 마지막으로 유로콥터 BK117의 ADASYS 로터 시스템 성공사례 및 향후 해결해야 할 기술적 제한사항 등을 간략하게 기술하였다.

주제어: Trailing Edge Flap (TEF), 진동제어, 압전재료(PZT), 로터시스템, 헬기

## 1. 서론

헬기는 로터시스템, 트랜스미션, 엔진 등 비행체의 많은 부분이 회전하는 구성품으로 이루어진 비행체로서, 구성품 자체 회전에 의해 진동이 유발되는 것이 고정익기와 다른 특징 중의 하나이다. 이러한 진동은 헬기뿐만 아니라 헬기에 탑승하는 승객, 조종사 및 승무원 등에게 이롭지 않게 작용한다. 특히, 헬기 구조물의 수명 단축, 조종사의 피로도 증가에 따른 안전성 감소, 승객의 안락성 감소 등의 문제점 때문에 끊임없이 진동을 감소시키거나 제어하고자 하는 노력들이 진행되었다. 헬기의 진동을 유발하는 구성

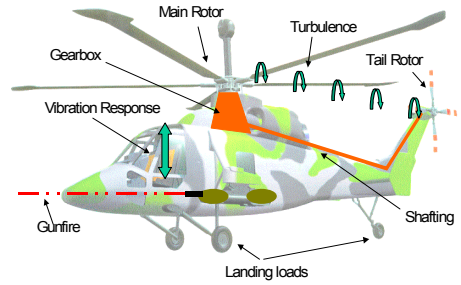
품 중 특히 로터 시스템은 헬기 진동에 가장 크게 영향을 미치는 구성품으로서 설계단계에서부터 진동 저감을 위한 가능한 요소를 최대 반영하여 설계되어야 한다. 특히 로터에서 발생되어 동체에 전달되는  $N \times \Omega$  (블레이드 개수  $\times$  로터 회전속도) 주파수의 진동 하중이 가장 큰 진동으로 주요 저감 대상이다. 따라서 동체 진동을 줄이기 위한 우선적 방법으로 로터 시스템에서 발생하는 진동하중을 줄이기 위한 노력의 일환으로 로터 진동제어를 위한 다양한 개념 및 하드웨어 장치들이 개발되었다.

로터 진동제어 방법은 크게 수동적 진동제어 방법과 능동적 진동제어 방법 두 가지로 분류할 수 있다. 수동식 진동제어 방법은 고정된 방식으로 특정 주파

수의 진동만 줄여주는 것인데 대표적인 예로 로터 설계시 질량 및 강성 분포를 최적화하여 설계하는 방법, 바이필라(bifilar)와 같은 무게 밸런스를 부착하는 법, 래프트(raft)와 같이 탄성체 재료로 만들어진 감쇠기를 부착하는 법 등이 존재한다. 그러나 이러한 수동적 진동제어 방법은 로터에서 발생하는 특정 주파수에 해당하는 진동을 잡아주기 때문에 여러 다양한 진동원이 있는 헬기에 적용하기에는 제한적이다. [1]. 능동적 진동제어 방법은 수동적 진동제어 방법과는 달리 여러 다양한 주파수의 진동을 줄여줄 수 있도록 변경이 용이한 장점이 있다. 대표적인 예로 블레이드 뒷전에 플랩 장착 후 작동기와 연결하여 진동을 제어하는 Trailing Edge Flap (이하 TEF) 방법, 블레이드 자체의 스파나 외피 구조에 스마트 재료를 심어 비틀림이 발생하도록 하는 Active Twist Rotor (이하 ATR) 방법, 로터 시스템의 피치링크를 작동기로 교체하여 진동을 제어하는 방법 등이 존재한다.

본 논문에서는 로터의 진동제어 방법 중 수동적 진동제어 방법에 대한 종류 및 개요를 먼저 간략하게 소개한 후 능동적 진동제어 방법에 대한 종류 및 개요를 소개하였다. 본문에서는 능동적 진동제어 방법 중 최근 비행시험에 성공한 TEF 방법을 다양한 개념 및 장치 등을 포함하여 중점적으로 기술하였으며, 특히 TEF 구현 방법에 대한 사례 및 동향을 중점적으로 기술하였다. 추가적으로 TEF이외에 로터 진동제어에 적용되고 있는 ATR 방법 등을 간략하게 소개하였다. 마지막으로 결론에서는 향후 로터 진동제어를 위해 추가적으로 해결해야 할 기술적 한계 등을 기술하였다.

아래 제시된 그림 1은 헬기의 진동 원인을 개략적으로 도식화하여 보여주고 있다. 군에서 사용하는 무장헬기의 경우는 총포사용에 따른 진동도 추가적으로 존재한다. 그림 2에서는 헬기설계단계에서 1차적으로 우선 적용되는 진동저감 방법론들이 요약되어 기술되어 있다. 중요한 것은 헬기 개발에서 부가적인 진동제어 장치 장착을 전제하기보다는 설계단계에서 최대한 저진동 설계 기법을 적용해야 된다는 것이다. 이후에 본 논문에서 소개하는 진동제어 방법들을 적용해야 되는 것이 일반적인 순서라 할 수 있다.



자료 : Super Lynx 질총교역 기술이전 세미나 자료, 1999

그림 1. 헬기 진동 원인들

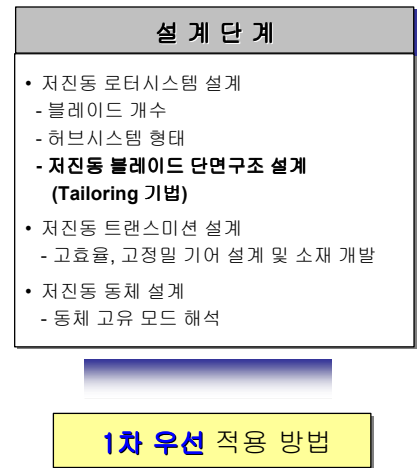


그림 2. 설계단계에서 적용되는 진동저감기술

### 1.1 수동적 진동제어 방법

로터 진동의 수동적 진동제어 방법으로 대표적인 것은 로터 트래킹 및 밸런싱용으로 부착된 트림 탭(trim tab), 원심력을 이용한 바이필라(bifilar), 스프링을 이용한 로터 헤드 완충기(rotor head absorber) 등의 방법이 존재한다. 현재 트림 탭은 대부분의 블레이드에서 동적 밸런싱(dynamic balancing) 작업을 할 때 사용하며, 바이필라(bifilar) 방법은 로터 진동저감을 위해 BO-105, WG-30 등 많은 헬기에서 적용되고 있다. 또한 로터 허브 중심부에 로터 헤드 완충기를 장착하여 로터 회전 때 따른 진동을 줄여준다. 그러나 이러한 수동적 진동제어 방법은 설계단계에서 적용되는 것이 아니라 시제작 및 운용단계에서 적용되는 개념으로서 중량 페널티(weight penalty) 등

이 존재하게 된다. 그림 3에는 트림 탭을 이용하여 밸런스를 잡는 방법과 바이필라를 적용하는 예가 제시되었다. 그림에서 보는 것처럼 상당히 큰 중량 패널팅이 있다는 것을 알 수 있다. 그림 4에는 로터 헤드 완충기의 모습이 제시되었으며, 부가적으로 적용 시와 미적용시의 진동 수준을 비교하여 제시하였다. 완충기를 부착하면 미부착시보다 진동이 50% 이상 감소하는 것을 확인할 수 있다.

한편 로터 자체에서 발생하는 진동을 감소시키기 위한 것 외에 로터와 트랜스미션에서 동체에 전달되는 부위에 감쇠기를 장착하여 동체에 전달되는 진동을 줄여주는 방법이 있다. 대표적인 방법으로 댐핑이 존재하는 탄성체 재료 (elastomeric materials)로 만들어진 감쇠 부품을 트랜스미션과 동체 장착부에 부착하는 방법인데 대표적인 방법으로 raft 방법이 있다. 이 방법은 웨스트랜드(Westland) 헬기사가 개발한 W-30 헬기에 적용되었었다. 이 외에도 유체의 점성을 이용하여 진동원을 고립시키는 LIVE 시스템, 상쇄 질량을 부착하여 특정 주파수의 진동 진폭을 완화시켜주는 DAVI 시스템 등이 존재한다. 그림 5에는 raft 장착 시스템의 적용 예를 보여주고 있다.

이러한 수동적 진동제어 방법은 앞서 기술한 것처럼 특정 주파수의 진동을 감소시키기 위해 사용하는 방법으로, 한번 장착되면 고정되는 형태로 다양한 진동 원인을 제거하는 데에는 한계가 있다. 그러나 능동적 진동제어 방법과 달리 별도의 전원공급장치, 유압장치 등과 같은 지원시스템이 없이도 사용할 수 있으므로 비교적 간단하면서 효율적으로 적용할 수 있는 장점이 있다.

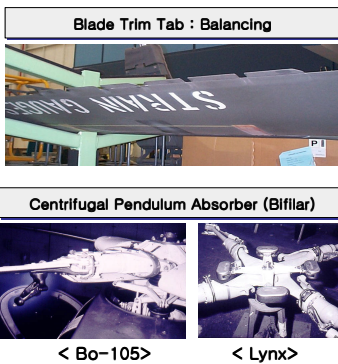
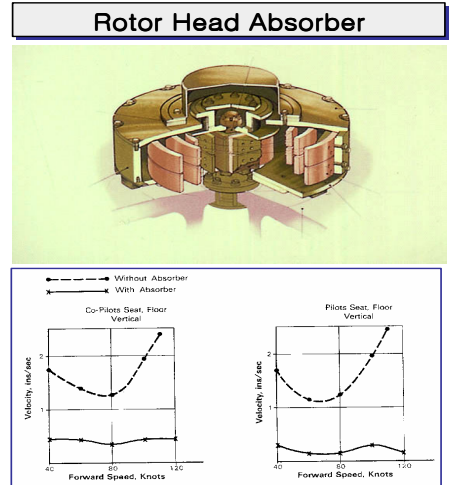


그림 3. 수동적 진동제어 방법 적용 예



<Flexispring Absorber : Lynx, W-30>

그림 4. 로터 헤드 완충기 적용 예

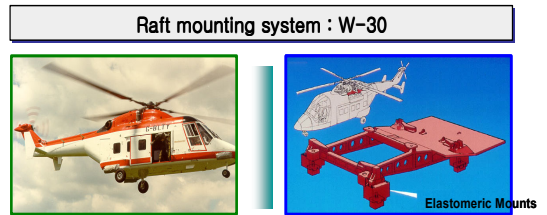


그림 5. Raft 장착 시스템 적용 예

## 1.2 능동적 진동제어 방법

로터 진동 제어를 위한 능동적 진동제어 방법은 효율적인 진동제어를 위한 작동기의 개발을 중심으로 발전하였다. 초기에는 일반적인 유압식 작동기를 장착하여 진동 소스를 제어하였으나, 이런 유압식 작동기는 부피뿐만 아니라 질량도 상당히 크며 부수적인 유압공급장치 등이 병행되어 지원되어야 하기 때문에 헬기 성능을 저하시키는 주요인으로 작용하였다. 그러나 압전재료와 같은 스마트 재료들이 발달함에 따라 이를 응용한 다양한 작동기들이 개발되어 헬기 로터 진동제어에 적용되기 시작하였다. 이러한 스마트 재료들 중 대표적인 것은 압전재료 (PZT), 자왜재료(magnetostrictive, MS), 형상기억 합금(shape memory alloy, SMA), 전기유변유체 (electrorheological fluids) 등이 존재한다. 이 중

압전재료의 경우 헬기 로터 진동제어를 위한 작동기로 응용하기 위한 연구가 상당히 진행되었으며, 2005년에는 BK117 헬기 로터 시스템에 장착하여 비행시험까지 성공하였다 [2]. 이처럼 스마트 재료를 로터시스템에 적용하는 방법은 로터 진동을 제어하는 방법에 따라 다양한 형태가 존재한다. 블레이드 루트(root)에서 블레이드 전체의 피치를 제어하는 방법, 블레이드에 플랩을 장착하여 일부만 제어하는 방법, 블레이드 외피나 스파에서 비틀림 각을 제어하는 방법 및 블레이드 익형의 캠버를 변형시키는 방법이 존재하게 된다.

또한 스마트 재료를 적용한 작동기의 종류 및 형태도 다양하게 존재하는데 크게 블레이드 내부 구조물에 심어 넣는(embedded) 형태와 별도의 작동기를 제작한 후 블레이드에 장착하는 형태가 존재한다. 별도의 작동기 형태도 힘을 발생하는 원리에 따라 적층형(stack type), 굽힘형(bender type) 형 등이 존재한다.

그림 6은 로터 제어를 위한 방식, 스마트 재료 및 스마트 작동기와의 상호관계를 보여주고 있다.

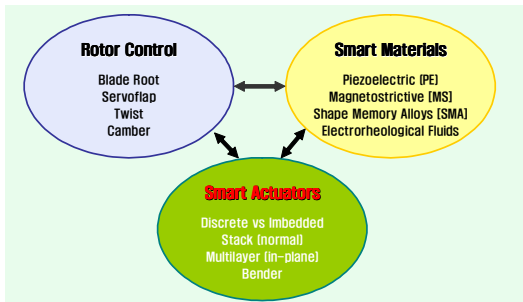
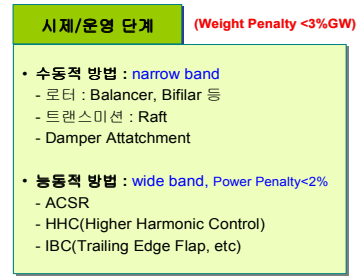


그림 6. 로터 제어, 스마트 재료 및 스마트 작동기와의 상호관계

앞에서 로터 진동제어 방법에 대하여 개략적으로 설명한 수동적 진동제어 방법과 능동적 제어 방법은 대부분이 설계단계에서 적용되는 것이 아니라 헬기의 시제 및 운용단계에서 적용된다. 현재는 헬기 운용 단계에서 로터 시스템에 적용되고 있는 능동적 진동제어 방법은 존재하지 않으나 BK117 헬기의 비행시험 성공을 계기로 조만간 운용단계에서의 적용이 예상된다. 그림 7은 수동적 진동제어 방법과 능동적 진동제어 방법의 종류 및 특성을 비교하여 제시하였다.



**2차 차선 적용 방법**

그림 7. 수동적 방법 및 능동적 방법의 종류

## 2. TEF의 종류 및 작동 원리

헬기 로터시스템의 진동 제어에 적용되는 능동적 진동제어 방법 중 대표적인 것이 TEF인데, 이는 작은 힘으로 진동제어를 크게 할 수 있는 장점이 있다. TEF를 구동하기 위한 작동기로서는 현재 대부분 압전재료를 사용하고 있기 때문에 본 논문에서는 압전 재료를 적용한 TEF의 종류 및 작동원리를 기술하고자 한다. 먼저 압전재료 작동기의 특성을 간략하게 기술하고, 압전재료 작동기의 종류 및 로터 시스템의 TEF에 적용하는 방법 등을 기술하고자 한다. 최근 기술이 적용된 작동기 소개뿐만 아니라 현재 상용화되어 상용으로 판매되고 있는 압전재료 작동기의 예도 제시하고자 한다.

### 2.1 압전재료 작동기의 특성

압전재료 작동기는 다른 스마트 재료를 적용한 작동기에 비해 응답이 빠른 특성이 있다. 이러한 특성은 헬기 로터 시스템과 같이 고속으로 회전하면서 발생하는 진동 소스를 실시간으로 제어할 수 있는 장점이 있다. 또한 단위 변위 당 요구되는 파워 크기도 상대적으로 작기 때문에 헬기와 같은 비행체에서는 적용하기에 매우 유리하다. 더구나 로터 블레이드의 형상, 요구조건 등에 따라 다양한 형상 및 조합으로 적용할 수 있는 장점이 있다. 또한 얇은 시트 형태로 존재하기 때문에 테일러링(tailoring)을 통해 다양한 형상을 구현하기에 용이하다. 이러한 특성은 손쉽게 블

레이드 스파 등 내부구조에 심을 수 있거나, 회전면에서 작동기로 부착하여 쓸 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점들로 인해 압전재료 작동기는 로터 시스템 진동제어에 가장 많이 적용되고 있는 상황이다.

압전재료 작동기는 크게 2가지 형태로 구분되는데 첫 번째는 굽힘형 작동기(bender actuator)이다. 압전재료 2개가 적층되어 한쪽은 늘어나고, 반대쪽은 줄어들 때 생기는 굽힘에 의해 작동력 발생시키는 방법이다. 압전재료 양극에 가해주는 전압의 전극방향을 다르게 함으로써 한쪽은 인장력이, 다른 한쪽은 압축력이 발생하여 이 차이에 의해 작동기가 굽혀지게 되며, 이때 굽힘에 의한 변위차이를 이용하여 작동기로서의 기능을 갖는 것이다. 이 작동기는 변위가 큰 반면 작용하는 힘은 상대적으로 작은 것이 특징이다. 두 번째는 적층형 작동기(stack actuator)이다. 압전재료를 여러 층으로 적층하여 원하는 변위 크기와 힘을 직렬로 얻는 방법이다. 적층형 작동기는 압전재료의 수직변형률을 작동하는 힘의 동력으로 사용하게 된다. 이러한 적층형 작동기는 큰 힘을 낼 수 있는 장점은 있으나 큰 변위를 내지 못한다. 그림 8에는 굽힘형 작동기의 원리가 제시되었으며 그림 9에는 적층형 작동기의 원리가 제시되었다. [3]

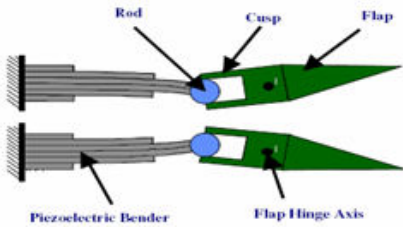


그림 8. 압전재료 굽힘형 작동기(Bender Actuator) 작동원리

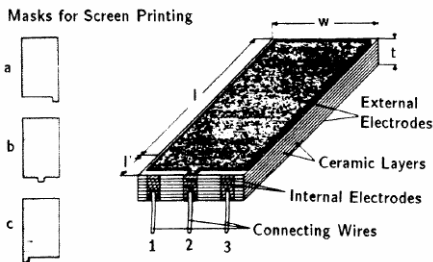


그림 9. 압전재료 적층형 작동기(Stack Actuator) 작동원리

## 2.2 압전재료 작동기의 종류 및 특징

TEF에 적용되고 있는 압전재료 작동기에는 여러 다양한 형태들이 존재하는데 여기에서는 가장 보편적으로 많이 적용되는 있는 사례를 중심으로 기술하고자 한다. 바이모프 굽힘형 작동기 (bimorph bender actuator), L-L 적층형 작동기, X-frame 작동기, APA 작동기 등을 소개하였다.

### 2.2.1 바이모프 굽힘형 작동기

미국 메릴랜드 주립대학(University of Maryland, UMD)에서는 바이모프 굽힘형 작동기를 개발하여 로터 시스템 진동제어 및 성능 향상에 적용하고 있다. 대표적인 적용 기술을 소개하면, 블레이드 스파에 바이모프 한쪽 끝단을 지지하여 외팔보로 만든 다음, 다른 쪽 끝단은 기계적 링크지를 통해 플랩 힌지와 연결되어 있어 바이모프에 전압을 가해주면 한쪽 끝단에서 처짐이 발생하여 플랩 힌지를 중심으로 회전하게 된다. 이러한 회전은 플랩 각을 발생하도록 한다. 그림 10에는 이러한 바이모프 굽힘형 작동기의 원리를 설명해주는 그림이 제시되었다. 한편 블레이드 스파 뒤로 바이모프 작동기를 장착함으로써 시위방향의 무게중심이 뒷전 쪽으로 이동하는데 이를 상쇄시키기 위해 블레이드 앞전에 상쇄 웨이트를 심어주게 된다. 그림 11에는 블레이드에 설치된 바이모프 굽힘형 작동기 예를 보여주고 있다.

UMD에서는 마하축소형 블레이드를 제작하여 시험하였다. 총 8개 층의 압전재료를 테이퍼지도록 적층하여 충분한 변위와 힘이 발생하도록 하였다. 두께 8mm, 길이 40mm의 작동기를 통해 구현되는 로터 3/rev 진동하중의 진폭은 50%이상 감소하는 것을 알 수 있다. 이로써 바이모프 굽힘형 작동기를 플랩에 적용하여 TEF에 구현할 경우 상당히 많은 효과를 낼 수 있는 것을 알 수 있다. 플랩의 크기는 반경 75%R부터 83%R에 위치하고 코드 길이의 20%C이다. TEF에 의한 플랩 처짐각은 약  $\pm 4^\circ$ 가 구현되었다. 그림 12와 13에 바이모프 작동기의 성능 및 마하축소 실험을 통해 나온 3/rev 진동 하중의 진폭 감소 효과에 대한 결과가 제시되었다. [4]



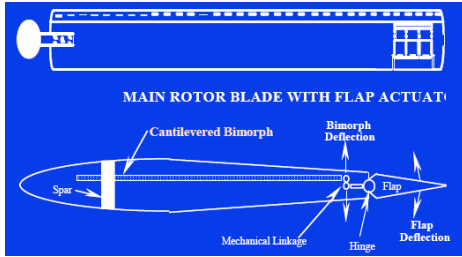


그림 10. 바이모프 굽힘형 작동기 원리

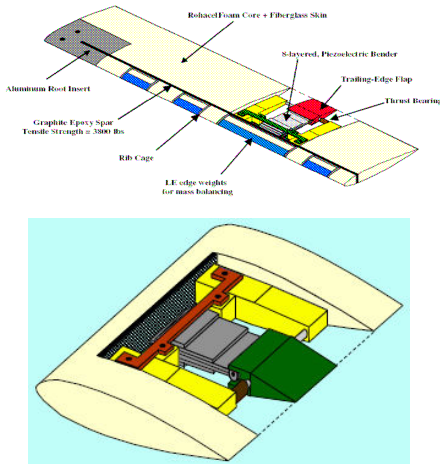


그림 11. 블레이드에 설치된 바이모프 작동기 (UMD)

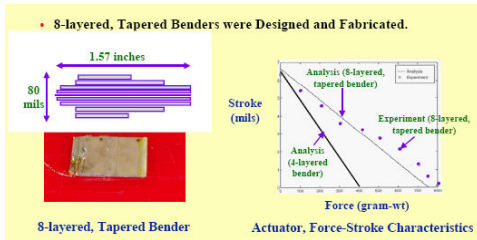


그림 12. 바이모프 굽힘형 작동기 성능

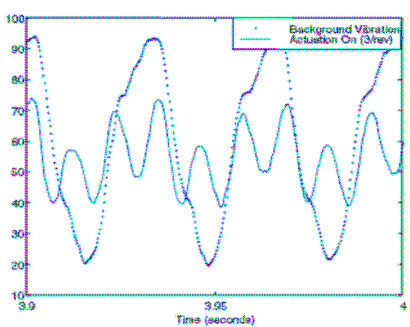


그림 13. 3/rev 진동하중의 진폭 감소 효과

### 2.2.2 L-L 적층형 작동기

미국 메릴랜드 주립대학(University of Maryland, UMD)에서는 굽힘형 작동기의 단점을 보완하기 위해 적층형 작동기를 개발하였는데, 이 작동기는 상대적으로 작동력이 강한 반면 변위가 작다는 단점이 있다. 이러한 작은 변위를 크게 하기 위한 증폭 시스템을 개발할 필요성이 있었는데 이것이 L-L 형태의 작동기이다. 기본적으로 적층형 작동기를 적용하였으며, 지렛대의 원리를 이용하여 double lever amplification 개념을 적용하여 L-L형 적층형 작동기라고 불리기도 한다. 내부와 외부에 각각 Lever가 존재하여 2번에 걸쳐 변위가 증폭되는 원리이다. 여러 가지 적층형 작동기를 가지고 시험하였으며 시험에 적용되었던 작동기의 예가 그림 14에 제시되었고, Double Lever Amplification 원리가 그림 15에 도식화되어 설명되었다. 적층형 작동기에서는 충분한 작동력을 바탕으로 기계적 링크지, 지렛대 원리, 가위 원리 등의 부수적인 기계장치와 연결되어 변위를 증폭시킴으로써 힘과 변위의 요구조건이 충족되도록 발전되어 왔다. 그림 16에는 실제로 하드웨어로 구현된 작동기와 블레이드의 TEF에 적용된 사례를 보여주고 있다. [5]

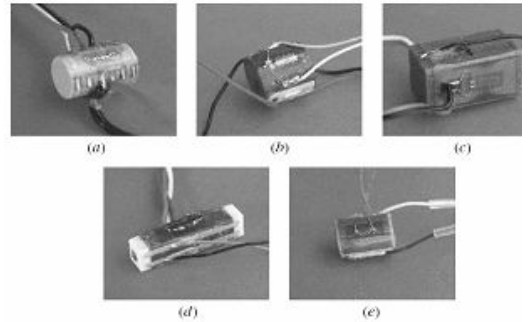


그림 14. 압전재료 적층형 작동기 예

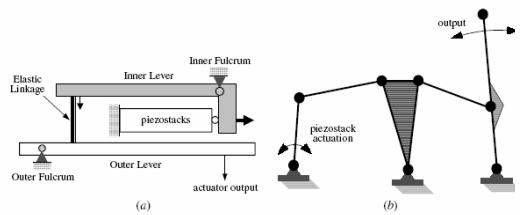


그림 15. Double Lever Amplification 작동원리

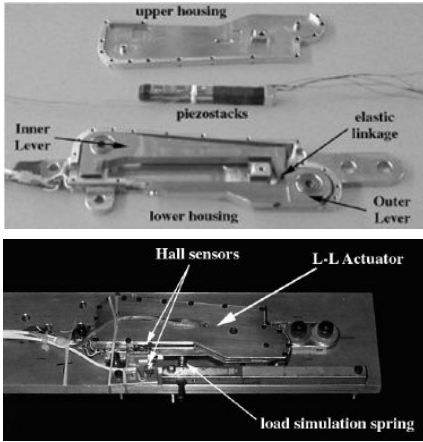


그림 16. L-L 적층형 작동기 및 블레이드 설치 모습

2.2.3 X-Frame 작동기

적층형 작동기 중 상용화되어 쓰이고 있는 대표적인 압전재료 작동기에는 X-Frame 작동기가 로터 시스템의 TEF에 적용되고 있다. X자 형의 링크지를 이용하고 힌지가 중앙에서 한쪽으로 치우쳐져서 변위가 짧은 쪽에 압전재료 작동기를 설치하고, 변위가 큰 끝단에는 실제 변위로 사용되는 출력부가 되도록 움직이는 원리이다. 그림 17에 X-Frame 작동기의 원리가 개략적으로 기술되었다. 그림 18에는 X-Frame 작동기의 TEF 적용 예가 제시되었다. 이러한 X-Frame 적층형 작동기는 MD900 헬기의 주 로터에 장착되어 비행시험을 통한 기술시험을 수행하였으며, 축소형 로터 블레이드에 장착하여 여러 기술시험을 수행하고 있다. 그림 19에는 로터 블레이드에 X-Frame 작동기를 장착하여 시험하는 장면을 제시한 것이다. [6]

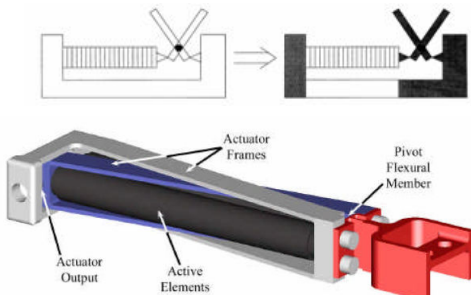


그림 17. X-Frame 작동기의 작동원리

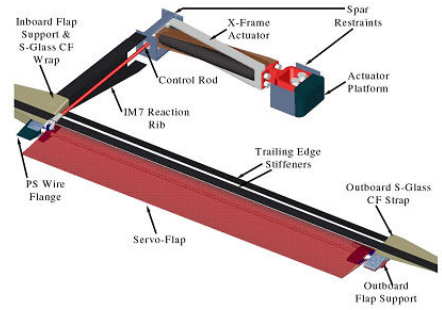


그림 18. X-Frame 작동기의 TEF 적용 예

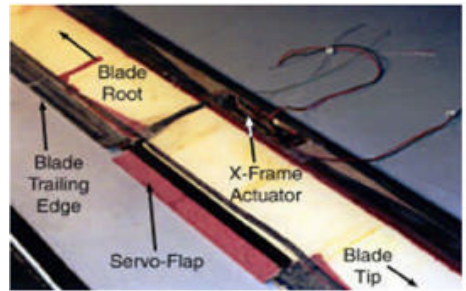


그림 19. X-Frame 로터 블레이드 적용 예

2.2.4 APA 작동기

적층형 작동기 중 상용화되어 쓰이고 있는 또 하나의 사례는 CEDRAT Amplified Piezo Actuators (APAs)이다. 프랑스 ONERA 연구소에서 축소 로터 블레이드에 장착하여 기술시험을 마쳤으며, 여러 가지 모델에 대한 성능 시험을 수행하였다. APA 작동기의 대표적인 원리는 타원형 프레임 내부 장축에 압전재료 적층형 작동기를 설치하여 큰 힘을 이용하여 변위를 발생시키면 단축에서 약 2~5배의 큰 변위가 생기는 원리이다. 그림 20에 APA 작동기의 작동원리 설명이 도식화되어 제시되었다. 그림 21에는 ONERA의 BRAVOS 시험치구에서 축소 로터 블레이드에 장착한 APA 작동기에 의한 TEF 구현을 시험하고 있는 모습을 보여주고 있다. 이 시험에서 플랩 각도는 -7도~+11도까지 구현하였으며, APA 작동기에 쓰인 압전재료는 KEPCO사의 Bop200-1M 모델 (Power : ±200V, ±1A )을 적용하였다. 현재 상용화되어 판매되는 모델들에는 APA 200 Series, APA 500 Series 등이 존재한다. [7]

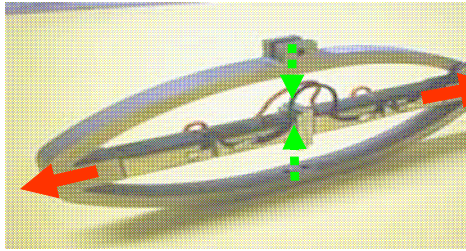


그림 20. APA 작동기의 동작원리

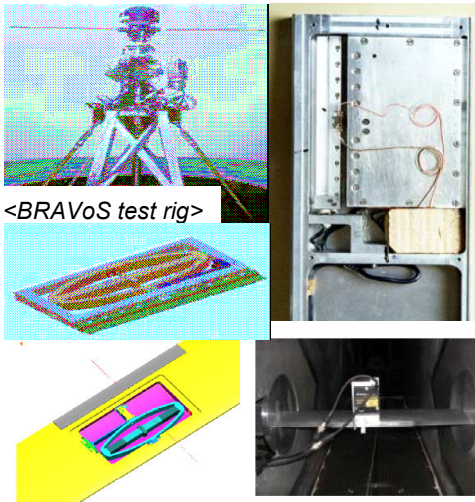


그림 21. APA 작동기의 로터 블레이드 적용 예

그림 22에는 앞에서 언급된 로터시스템의 TEF에 적용되는 여러 가지 작동기에 대한 사양을 개괄적으로 비교한 표를 제시하였다. 각각 사용 목적에 따라 요구되는 압전재료의 전압 및 전류 등이 다르고 이에 따라 구현되는 힘과 변위도 다르지만 설계시 필요한 요구사항에 따라 적절한 작동기를 선정하는데 도움이 될 것이다. [7]

	Manyland 1/7" scale blade model in-house fabrication	Manyland full scale blade Prototype	CEDRAT AFA200M mass production	CEDRAT AFA250M mass production	CEDRAT AFA230C For 1/2.62" model mass production
Actuator technology	Multi-layer actuator configuration (8 layers)	Piezostacks with amplification mechanism	L-L Piezostacks in elliptical housing	Piezostacks in elliptical housing	Piezostacks in elliptical housing
Voltage	+120V to +400V	0-250V	0-250V	0-200V	0-250V
Mass of actuator	14g	85g	154g	258g	290g
Blocked force (F)	8.3N	53 N (12 lbf)	56 N	570 N	890 N
Max. strain (strain (%))	165	2540 (885 μm)	200 μ	500 μ	250 μ
Stiffness	3.048 10 <sup>6</sup> N/m	0.021 10 <sup>6</sup> N/m	0.280 10 <sup>6</sup> N/m	1.540 10 <sup>6</sup> N/m	3.48 10 <sup>6</sup> N/m
Resonance frequency	above 150 Hz	above 150 Hz	600 Hz	450 Hz	500 Hz
Energy to weight ratio of actuator	23.8 10 <sup>3</sup> Nm/kg	53.1 10 <sup>3</sup> Nm/kg (28 10 <sup>3</sup> Nm/kg)	172.7 10 <sup>3</sup> Nm/kg	342.5 10 <sup>3</sup> Nm/kg	184.0 10 <sup>3</sup> Nm/kg
Ratio of Energy... A/L	0.44	1	3.21	6.45	3.47
Energy					
Width (without leads)	33 mm	71 mm	17 mm	53 mm	69 mm
Length (span axial)	60 mm	183 mm	55 mm	145 mm	140 mm
Thickness	2 mm to 5 mm	19 mm	5 mm	12 mm	10 mm
Peak-to-peak flap deflection	±11°S	±11°S	±2°S (extrapolated)	±5°S (extrapolated)	±4°S

그림 22. 압전재료 작동기의 성능 비교표

### 2.2.5 Terfenol-D Driven Flaps

압전재료 작동기 이외에 TEF에 적용되는 방법으로 자왜재료인 Terfenol-D Driven 플랩 작동기가 존재한다. 이 작동기는 UH-60A에 적용되는 것을 기준으로 설계하였으며, 총 중량의 1% 이내 (180 lb)로 제한되어 설계되었다. 총 24개의 작동기가 적용되었으며, 작동기 자체의 중량은 95lb로서 전체 헬기 중량의 0.5%를 차지하였다. 조종각의 범위는 ±2° 범위이며 작동기의 파워는 전체 헬기 파워의 약 0.67%를 소모하였다. Individual Blade Control 개념을 적용하여 진동의 약 90% 이상을 감소시켰다. 그림 23에 Terfenol-D Flap 구성도가 제시되었다. [8]

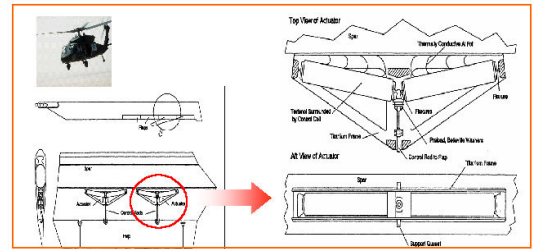


그림 23. Terfenol-D Driven Flap 구성도

### 2.3 TEF 로터시스템 비행시험 성공

최근에 압전재료 작동기를 이용한 TEF를 실제 헬기의 로터시스템에 적용하여 비행시험에 성공하였다. 2005년 유로콥터 독일(Eurocotper Deutschland, ECD)사에서는 BK117 헬기에 TEF가 장착된 로터를 달고 제자리 비행 및 전진비행 등 다양한 비행조건에 대한 비행시험을 수행하였다. 여기에 장착된 로터 시스템을 ADASYS( Adaptive Dynamics System)로터라고 명명하였으며, TEF의 크기 및 위치에 따라 7개의 다양한 형상에 대한 시험을 통해 최종 형상을 확정하였다. 이번 비행시험 성공에서 눈여겨보아야 할 점은 이전의 TEF가 단일 플랩(Single Flap)을 사용하였지만 이번 ADASYS 로터의 경우 다중 플랩(Multi Flap)을 사용한 것이 특징이다. 이는 플랩 조종력 크기의 한계를 극복하기 위해 기존 단일 플랩을 2개로 분리하여 각각의 플랩에 작동기를 부착하여 움직이도록 하였다. 이렇게 함으로써 작동기 크기를 줄였을 뿐



아니라 원하는 작동기의 힘도 낼 수 있게 되었다. 이러한 BK117에 장착되어 비행시험에 성공하기까지는 BO105헬기에 기술 적용 가능성을 선행적으로 연구했으며, 이러한 지속적인 연구수행 결과로 비행시험에 성공을 거두었다. 그림 24에 후보로 선정된 TEF 위치 및 형상이 제시되었으며, 그림 25에는 Whirl Stand에서 지상시험을 수행한 장면을 보여주고 그림 26에는 비행시험 장면을 보여주고 있다. [2]

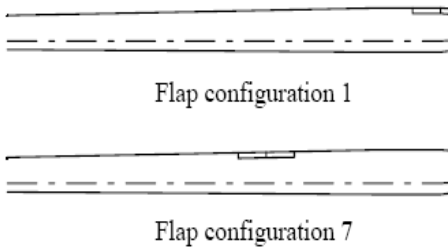


그림 24. TEF 장착 위치 및 형상



그림 25. TEF 지상시험 장면



그림 26. BK117 ADASYS 비행시험 장면

## 2.4 그밖의 로터시스템 진동제어 방법

### 2.4.1 Active Twist Blade

TEF이외의 로터시스템 진동제어 방법으로 많이 연구되었던 기술이 로터 블레이드의 스파나 스킨에 스마트 재료를 심어 넣어(Embedded in Spar or Skin) 블레이드 전체의 비틀림 각을 조정하는 방법이다. 메사추세츠 공과대학(MIT) 등에서 활발하게 연구하였으며, 가해주는 힘에 비해 출력되는 비틀림 각이 작아서 실제 헬기에 적용되지 못하고 있다. 실제 헬기 로터 시스템에 적용되기 위해서는 보다 많은 힘과 비틀림 각이 필요하게 되며 이를 위해서는 스마트 재료의 개발이 더불어 진행되어야 할 것이다. 대표적인 개념이 블레이드 스파에 심어 넣은 형태로서 블레이드 전체에 비틀림 각이 생기는 원리이다. 그림 27에 이러한 원리가 설명되었으며, 그림 28에는 실제 블레이드에 적용된 설계와 원리를 설명해 놓은 그림이 제시되었다. [2, 9]

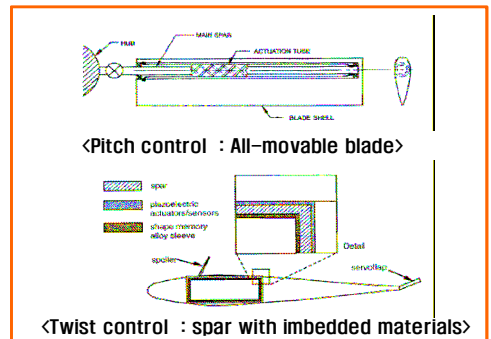


그림 27. Active Twist 로터 작동 개념

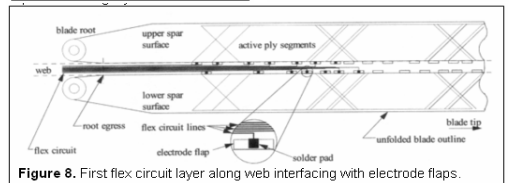
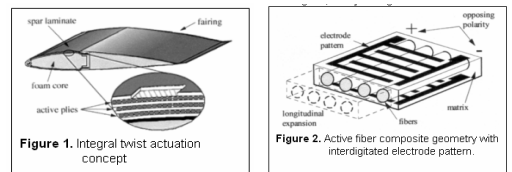


그림 28. Active Twist Blade 적용 예

### 2.4.2 압전재료 Embedded Twist Blade

UMD에서는 압전재료 작동기 이외에 블레이드 스킨 구조에 압전재료 재료를 심어 넣어 블레이드 전체의 비틀림 각을 구현하였다. 축소 로터 블레이드에 적용하여 프루드 축소 시험을 통해 성능을 검증하였다. 그림 29에 블레이드에 압전재료 재료가 심겨진 모습이 제시되었으며, 그림 30에는 시험결과가 제시되었다. 시험결과 블레이드 끝단에서 약 0.2도~0.5도까지 나왔다. 이러한 비틀림 각의 크기는 실제 적용하기에는 너무 작은 값이라 추후 성능 개량이 필요한 부분이다. [10]

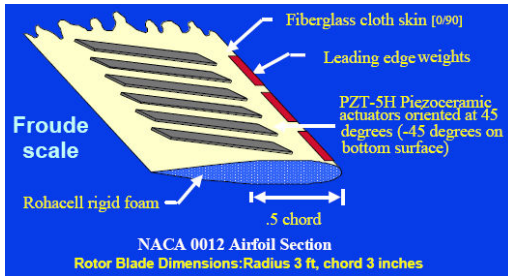


그림 29. 압전재료 Embedded Blade 개념

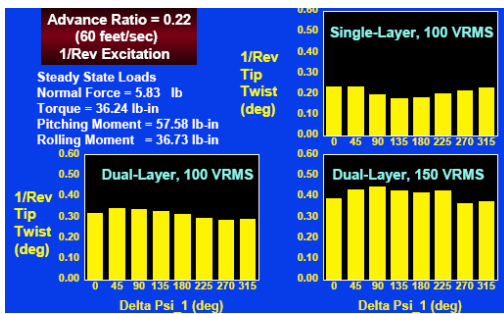


그림 30. 압전재료 Embedded Twist Blade 시험 결과

## 3. 결론

헬기 로터 시스템 진동제어를 위해 적용되고 있는 신기술로는 위에서 살펴본 바와 같이 압전재료, active fiber와 같은 스마트 재료를 작동기로 사용하여 블레이드의 플랩 각 제어나 블레이드 비틀림 각 제어에 적용하는 기술 등이 있다. 현재까지 확보되거나 개발된 기술로는 아직 실용화하여 양산에까지

적용될 수 있는 단계는 아니지만 조금씩 기술이 진보되어 비행시험까지 오기에 이르렀다. 아직 실용화를 위한 작동기의 파워 크기도 증가할 필요가 있고, 작동기의 피로수명 및 정비 등의 문제가 있지만 점차 모듈화 개념 등이 도입되어 이런 부분을 해결하고 있는 중이다. 본 신기술 조사를 통해 현재 수행하고 있는 “로터 시스템 소음 및 진동 저감 기술 연구” 등에 TEF 등의 개념을 적용하여 로터 블레이드에서 발생하는 진동을 최소화하고, 능동적인 제어가 가능하도록 연구할 예정이다.

## 참고문헌

1. Bramwell, George Done, David Balmford “Bramwell's Helicopter Dynamics”, Butterworth Heinemann, 2001, pp. 290-318
2. Oliver Dieterich, Bernhard Enekl, Dieter Roth, “Trailing Edge Flaps for Active Rotor Control Aeroelastic Characteristics of the ADASYS Rotor System”, 62nd AHS Forum, 2006, pp.1-20
3. F. K. Straub, "A feasibility study of using smart materials for rotor control," Smart Materials and Structures 5(1), 1996, pp. 1-10
4. O. Ben-Zeev and I. Chopra, "Advances in the development of an intelligent helicopter rotor employing smart trailing-edge flaps," Smart Materials and Structures 5(1), pp. 11-25, 1996
5. Taeh Lee and I. Chopra, "Design of piezostack-driven trailing-edge flap actuator for helicopter rotor" Smart Materials and Structures 10(1), pp. 15-24, 2001
6. <http://www.pkn.co.za/pap-HGFEEF.html>
7. Philippe Leconte and Hugues Mercier des Rochettes, "Experimental Assessment of an active flap device" 58th AHS Forum , June 11-13, 2002
8. Ralph C Fenn, James R Downer 등 "Terfenol-D driven Flaps for helicopter vibration Reduction" Smart Materials and Structures 5(1), pp. 49-57, 1996
9. <http://www.pkn.co.za/pap-SYDMJ.html>
10. Inderjit Chopra, "Status of Application of Smart Structure Technology to Rotorcraft Systems" KAIST Workshop, October 6, 2003