技術論文 J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(5), 415-421(2013)
DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.5.415

신규장비 적용을 통한 한국형 기동헬기 블레이드 생산공정개선

김영진*, 박차환*, 김홍주**, 심한석**

Improvement of Manufacturing Process for KUH by Applying new equipment

Young-Jin Kim*, Cha-Hwan Park*, Hong-Joo Kim** and Han-Seok Shim**
Defense Agency for Technology and Quality Sacheon Center*, Korea Aerospace Industries**

ABSTRACT

This paper contains a review of problems in the localized blade manufacturing process through KUH program and research for improvement of it. Contrary to development, mass production needs reliable process due to the long period of supply. The main process of blade manufacturing(Lay-Up, Curing) accepts new equipment(Robot, Heatmold) for improvement of it. And then, the evaluation is performed. Additionally, it is proven that blade which is made by the new process is suitable for mass production by conducting a performance test in the development phase.

초 록

본 논문에서는 한국형 기동헬기 사업을 통해 국산화 된 블레이드 생산 공정 중의 일부 문제점에 대해 검토하고, 개선에 대한 연구를 수행하였다. 개발과 달리 양산은 많은 항공기를 장기간에 걸쳐 군에 납품하기 때문에 신뢰성 있는 공정이 구축되어야 한다. 생산 공정 개선을 위해 로봇과 히트몰드를 개발하여 적층, 경화 공정에 적용하였고, 신규 장비의 성능을 평가하였다. 추가적으로 신규 공정을 통하여 생산된 블레이드를 개발에서 실시한 시험을 수행하여 품질 및 성능을 평가하여 개선된 공정이 양산에 적합함을 입증하였다.

Key Words : Blade(블레이드), Lay-Up Process(적층공정), Curing Process(경화공정), Robot(로봇), Heat-Mold(히트몰드), Performance Test(성능시험)

Ⅰ. 서 론

블레이드는 헬리콥터의 회전자용 허브로부터 회전력과 피치 조종력을 전달받아 헬리콥터에 양력, 추력 및 기동력을 발생시키는 장치이다[1]. 이 블레이드는 항공기의 성능 및 안정성에 큰 영향을 미치는 구성품이기 때문에, 설계 시에는 비행성능, 공력하중 및 소음과 같이 공기역학적인 특성뿐만 아니라 진동, 동적 안전성 및 비행 특성 등의 다양한 설계분야에 대한 종합적인 검토가 필요하다. 또한, 생산 시에는 설계에서 검토된 성능이 완벽히 구연 가능하도록 공정이 구성되고, 생산 장비가 갖추어져야 한다.

한국형 기동헬기 개발 과정에서 구축되어 사

† Received: January 30, 2013 Accepted: April 15, 2013
* Corresponding author, E-mail : 0jin79@hanmail.net
http://journal.ksas.or.kr/
pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

용된 블레이드 생산 공정 및 장비는 개발 특성상 수작업 및 Autoclave/Heatpad를 이용하여 진행이 되었다. 하지만 이 방식은 향후 많은 물량이 생산되는 양산에서는 생산성, 경제성 및 품질균일성 등이 떨어지는 단점이 있다.

이와 같은 단점을 보완하고자 본 연구에서는 블레이드 생산 공정의 핵심공정인 적층공정(Lay-Up)과 경화공정(Curing)에서 사용되는 장비를 신규 개발하여 양산에 적용토록 하였다.

기존에 수작업이던 적층공정을 로봇(Robot)으로 대체하였으며, Autoclave와 Heatpad를 이용하여 수행하던 경화공정을 Heat-Mold를 신규 개발하여 대체하였다. 또한 개발된 장비로 생산된 블레이드를 검증하기 위해, PPV (Pre-Production Verification), 기본물리량, 동특성, 휠, 정적구조, 피로, 비행 시험 등을 실시하여 양산공정이 성능이 개발공정 대비 동등이상임을 확인하였으며, 비파괴검사, 절단면관찰 등을 통하여 품질이 균일하게 나오고 있음을 입증하였다.

II. 본 론

2.1 로터 블레이드 생산 절차

2.1.1 로터 블레이드 전체 생산공정

블레이드는 내부 리브, 유리 섬유 스파, 유리/탄소 섬유 스킨, 폼 및 복합재 허니콤 코어로 구성된 다중박스 복합재 구조이다. 블레이드 제작 방법과 절차는 선진 항공사에서도 핵심 기술로 관리되는 공정으로, 각 제작사에 따라 다양한 접근법이 있을 수 있다. 한국형 기동헬기 블레이드 생산 공정은 Fig. 1의 순서로 생산이 진행이 된다. 복합재로 구성된 블레이드 특성상 적층공정과 경화공정이 반복되게 되어 있으며, 이 두 공정이 결국 블레이드 품질을 좌우하게 된다[2].

2.1.2 개발 적층공정(Lay-Up Process)

개발적층공정은 블레이드가 회전할 때 받는 하중을 지탱해주는 역할을 하는 로빙스파(Roving Spar, Fig. 2)를 만드는 공정이다. 일방향 유리 테이프 자재를 수작업으로 적층하여 로빙스파를 만드는데, 주로터 블레이드 1개를 제작하기 위해서는 4개의 로빙 스파를 제작하여야 하며, 약 7미터 길이의 로빙스파 전용 몰드 4개를 이용하여 각 로빙스파 당 160 ply씩 총 560 ply를 수작업해야 한다. 숙련 작업자 8명이 작업을 수행하였으며 인장력(약 10 ~20kg/ply) 적용 및 약 3.5km 적층 수작업을 해야 한다(Fig. 3).

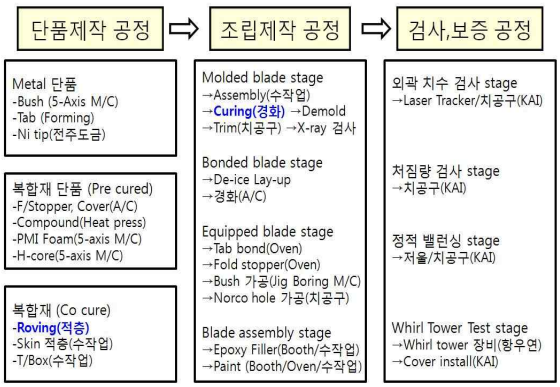

Fig. 1. Blade Manufacturing Process

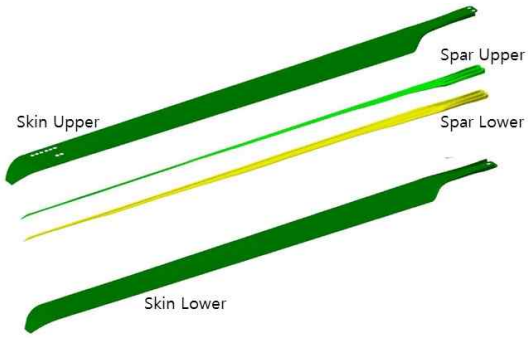

Fig. 2. Blade Roving Spar

Fig. 3. Lay-Up Process(Development)

2.1.3 개발 경화공정(Curing Process)

개발경화공정은 수작업 된 블레이드 조립체를 Autoclave로 이동하여 경화 싸이클에 따라 적층된 블레이드를 가열하여 경화시키는 것이다. 규격요구 온도를 만족하기 위해서 블레이드 금형에 Heatpad 120장을 부착하고 14개의 제어기를 이용하여 온도를 조절하였으며, Heatpad 만으로는 규격 온도를 만족 못하여 추가적으로 Autoclave 안으로 블레이드 금형을 이동하여 경화공정을 수행하였다(Fig. 4). 요구 온도인 130℃ 경화온도에 도달할 때까지 14개의 제어기, Heatpad 120장, 접점 480개 점검/확인/교체 및 열상승률 점검을 실시하여야 한다.

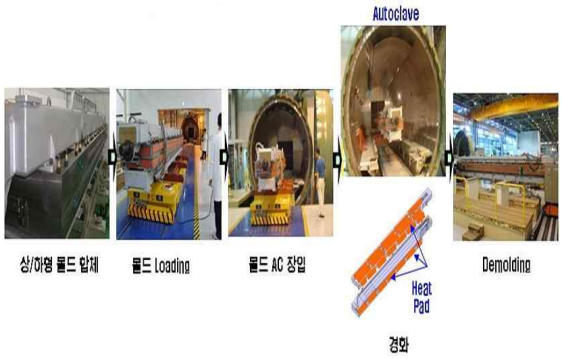

Fig. 4. Curing Process(Development)

Fig. 5. Lay-Up Process(Mass-Production)

Fig. 6. Curing Process(Mass-Production)

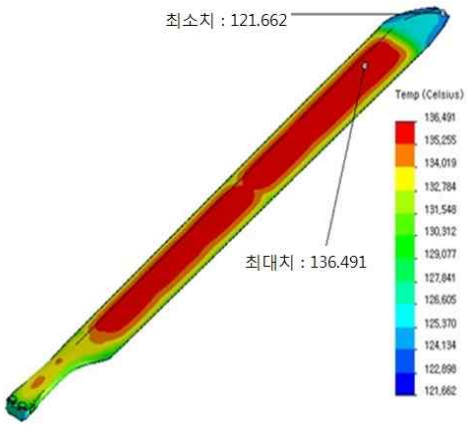

Fig. 7. Thermal/Flow Analysis

2.2 양산용 신규 장비 개발

2.2.1 신규장비 설계

양산에서 적용될 신규장비는 아래의 요소를 고려하여 가장 영향성 있는 적층공정과 경화공정 장비를 개발하였다.

- 수작업 공정 자동화 및 전용장비 이용
- 금형과 Autoclave 간 이동시간, 인시수절약
- 경화장비 열상승률(Heat-Up Rate) 개선
- 공정준비 작업 오류 개선 및 품질향상

2.2.2 적층공정용 로봇(양산용)

적층공정을 위해 6축 다관절 로봇(165kg급)을 적용하였다(Fig. 5). 실제 적층용 로봇에서 개발/적용된 내용은 아래와 같으며, 이를 통해서 생산시간 단축, 작업환경개선, 품질균일성 확보 등을 이룰 수 있다.

- End Effecter
- 적층 자동화 치공구
- 적층 후 Hot De-Bulking 장치
- 적층 자동화 프로그램(적층 경로, 매개변수)

2.2.3 경화공정용 Heat-Mold(양산용)

양산경화공정에서는 Heat-Mold를 신규 개발하여 적용하였다. Heat-Mold는 기존의 Autoclave와 Heatpad 대신 Heat-Mold의 홈으로 승온된 오일을 공급하여 자체에서 안정적으로 경화하는 단일 제어 방식을 구현하였다(Fig. 6). 이를 위해서 SolidWorks와 FloEFD 상용 프로그램을 사용하여 Heat-Mold 모델을 구현하고 열/유동해석을 수행하였다(Fig. 7). 본 장비를 통하여 이동시간 단축, 인시수 절약, 안정된 경화 싸이클 구현을 이룰 수 있다.

2.3 신규 장비 입증

2.3.1 적층 자동화 장비(Robot)

적층공정 개선 효과를 확인하기 위해 Short-Beam Test를 수행하였다. Short-Beam Test는 복

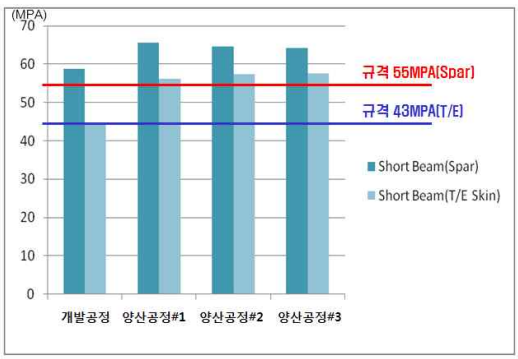

Fig. 8. The Result of Short-Beam Test

합재 각 층간 전단강도를 확인하는 시험으로 3점 굽힘시험보다 짧은 하단 부 지지부의 거리를 적용하여 시편의 표면이 아닌 내부의 층간 강도를 확인한다[3]. 결과는 Fig. 8과 같이 양산 공정에서 개선된 것을 확인할 수 있다.

2.3.2 경화 장비(Heat-Mold)

경화공정개선 효과를 확인하기 위해 복합재의 물리-화학적 특성인 유리전이온도(Tg)를 측정하는 시험을 수행하였다. 시험을 위해 DMA (Dynamic Mechanical Analysis)라는 장비를 이용한다. 시험원리는 Short-Beam 시편과 유사한 크기의 시편을 굽힘 시험의 형상으로 장비에 고정한 후 반복적인 변위를 가하면서(1Hz-0.1%굽힘 변형률) 온도를 서서히 올리면 온도가 급격하게 변화되는 부분(Tg)을 측정할 수 있다[4]. 결과는 Fig. 9와 같이 양산공정이 개선되는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 장비의 제일 중요한 성능인 열상승률을 Heatpad+Autoclave 방식과 신규개발된 Heat-Mold 방식으로 비교하였다. 결과는 Fig. 10과 같이 Heat-Mold가 Heatpad에 비해서 요구온도에 훨씬 빠른 시간 내에 안정적으로 도달하는 것을 확인할 수 있다.

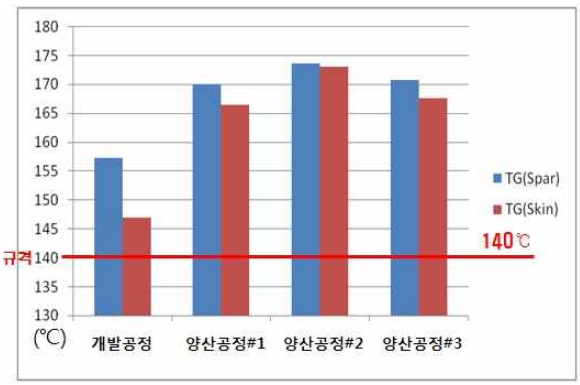

Fig. 9. The Result of Tg Test

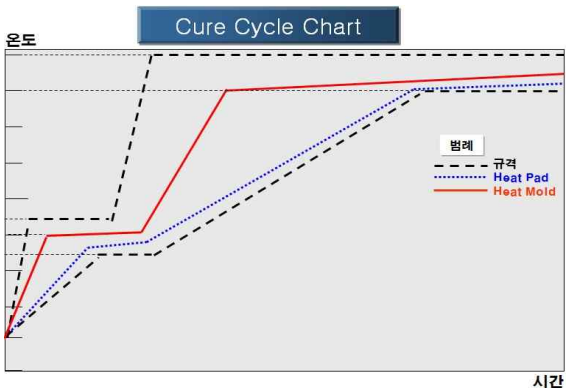

Fig. 10. The Comparison of Heat-Up Rate

2.3.3 블레이드 성능시험

가. PPV(Pre-Production Verification)

블레이드 생산 후 실제 단면 등을 확인하여 X-ray 검사와의 일치성 확인하는 파괴 시험을 포함하며, Resin Content, Tg-DMA, Flexural Test, Short Beam, Lap Shear, Flatwise, Insert/Receiver Pull-Out 등의 시편 시험 값을 개발시제와 비교한다. 시험 결과는 시제와 동등한 수준으로 나타났다(Table 1, Fig. 11).

나. 기본물리량 시험

기본물리량 시험은 프로파일측정과 처짐(강성) 시험, 단면 시험(무게, Chord 방향 CG) 등을 통하여 개발과 양산용 블레이드가 동일 수준에 있는 것이 확인 되었다(Fig. 12, 13, 14, 15).

Table 1. X-ray test

항목		요구 조건	개발	양산(자동화)		
				#1	#2	#3
X-ray [Crit. Area] mm MAX	L/E	2500	520	320	180	250
	T/E	520		190	185	180

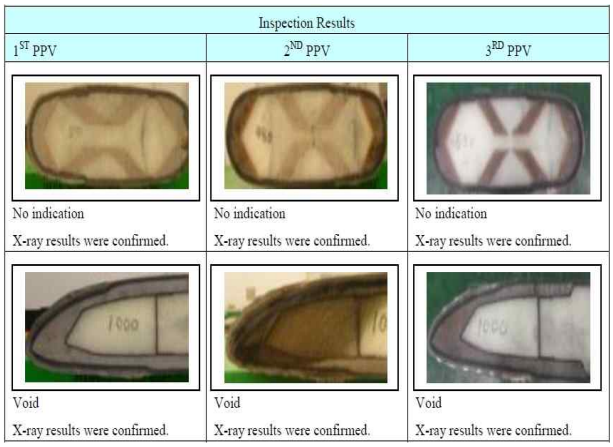

Fig. 11. Pre-Production Verification

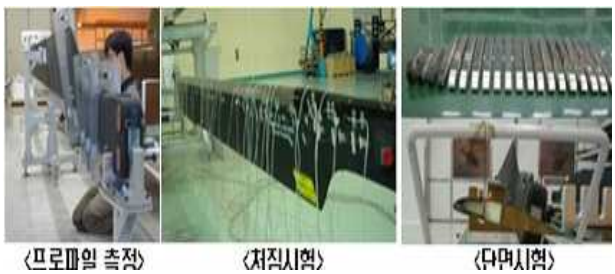

Fig. 12. Basic Property Test

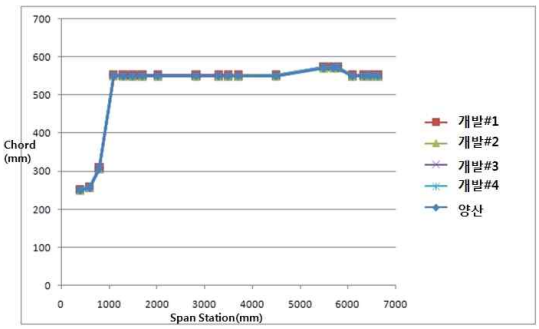

Fig. 13. Chord-wise Length

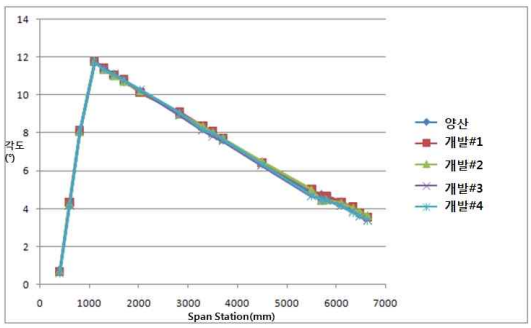

Fig. 14. Twist Angle

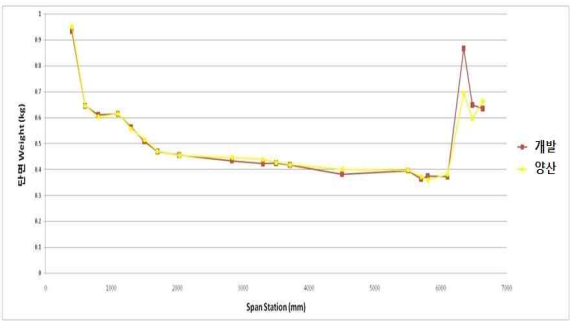

Fig. 15. Chord-Wise CG

다. 피로시험

시험하중은 원심력과 장착각도를 이용하여 면방향 및 회전방향 굽힘하중을 동시에 부가하여 실시하였으며, Airfoil 부위 시험은 4~5Hz, 0.88M 싸이클, Attachment 부위 시험은 0.5Hz, 0.96M 싸이클로 실시하였다. 시험결과는 피로특성이 향상되어 피로수명이 증가 되었다(Fig. 16, Table 2). 이는 적층공정 자동화와 경화공정 열상승률 향상, 열분포 균일화 등으로 인한 블레이드 품질 향상의 결과로 판단된다.

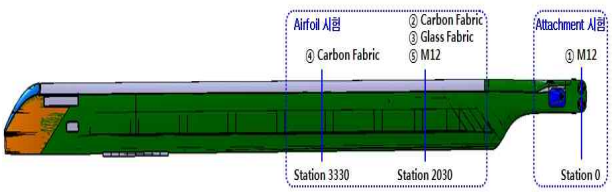

Fig. 16. Fatigue Test

Table 2. Fatigue Test Results

Material	Station	Mean Fatigue Limit(με)		증가율
		개발	양산	
M12(로빙스파)	0	3796	4045	6.6↑
Carbon Fabric	2030	3083	3221	4.5↑
Glass Fabric	2030	1969	2053	4.3↑
Carbon Fabric	3330	2260	2310	2.2↑
M12(로빙스파)	2030	1760	1842	4.7↑

Table 3. Modal Test

	개발	양산
모드	고유주파수	고유주파수
1	4.88	4.85
2	27.75	27.71
3	47.13	47.16
4	68.63	68.66
5	95.76	96.19
6	103.01	102.68

라. 동특성 시험

KUH 주로터 블레이드의 비회전 동적특성을 파악하기 위한 시험으로 모드 시험과 휠타워 시험으로 구성되어 있다. 시험결과는 시제와 양산용 블레이드가 유사하게 나오는 것으로 확인 되었다.

- 모드 시험(Modal Test)

충격 시험을 실시하여 고유진동수, 댐핑, 모드형상 등을 구하는 시험으로 결과는 Table 3과 같다.

- 휠타워 시험(Whirl Tower Test)

항공기 블레이드를 휠타워라는 시험 장비에 장착하여 회전시키면서, 블레이드 성능 및 동적 안정성을 보는 시험이다. 제자리 비행성능은 요구동력과 추력의 비를 나타내는 Figure of Merit(F.M)을 통해 확인할 수 있으며, 시험결과 양산용 블레이드 성능[F.M.=0871]은 개발용 블레이드 성능[F.M.=0854]보다 향상되었다(Fig. 17). 이 역시 적층공정 자동화와 경화공정 성능 향상으로 인한 블레이드 품질향상의 결과로 판단되며, 개발품에 비해 양산품은 같은 동력에서 더 큰 추력을 발생시켜 항공기 성능을 향상시킴을 알 수 있다. 동적 안정성 확인 시험결과 과속도 조건(299, 315, 329 rpm)에서 불안정성은 발생하지 않았다(Fig. 18).

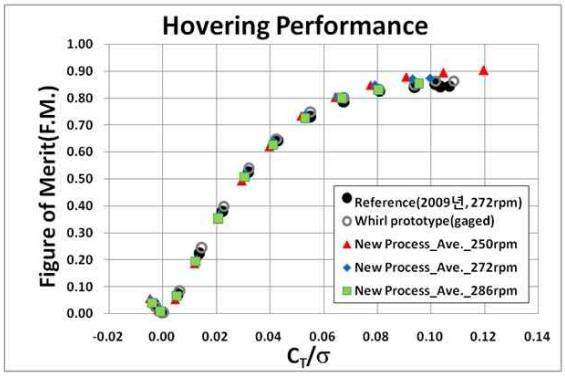

Fig. 17. Hovering Performance Comparison

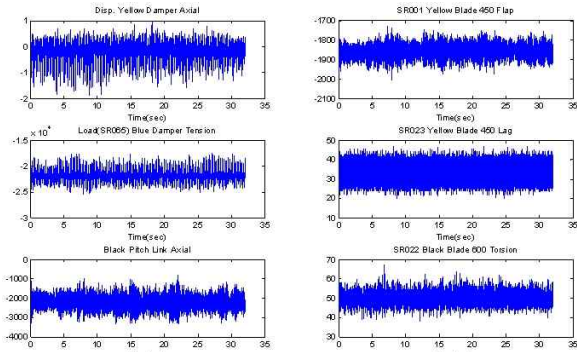

Fig. 18. Stability Test

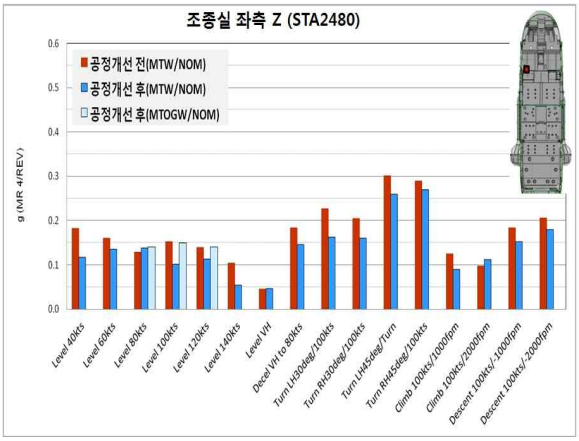

Fig. 19. Flight Test(Vibration)

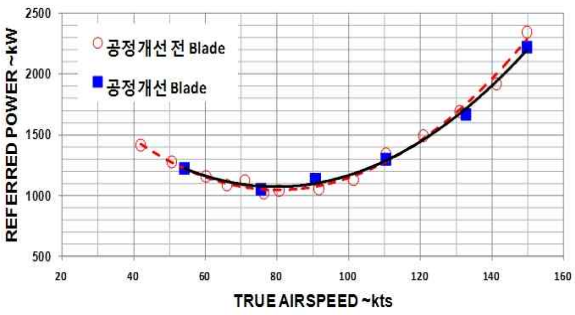

Fig. 20. Cruise Flight Performance Comparison

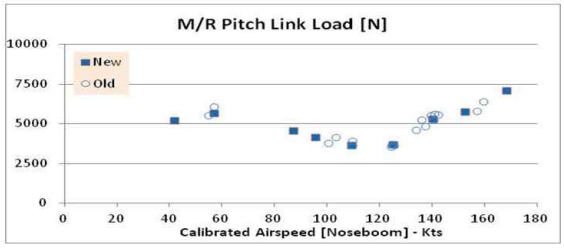

Fig. 21. Load Comparison

마. 비행시험

양산용 블레이드를 장착하고 총 6소티의 비행시험을 통하여 항공기 전체의 진동, 성능, 하중을 평가하였다.

- 비행시험결과 : 진동(Fig. 19)

진동시험 비행은 1소티로 진행되었으며, 수평, 감속, 상승, 하강, 선회 5가지 상세비행항목을 수행하여 진동수준이 개발과 유사함을 확인하였다.

- 성능시험결과(Fig. 20)

성능시험은 제자리와 수평비행(50, 70, 90, 110, 130 Vmax kts)을 수행 하였으며, 개발 대비 요구 토크 차이는 평가기준 5%내로 평가되었다. 제자리 비행의 경우는 평균 약 1.5% 감소했으며, 수평 비행은 평균 약 0.5% 감소하여 블레이드 성능 영향성은 미미한 것으로 판단되었다.

- 하중시험결과(Fig. 21)

하중시험은 제자리 비행, 상승/하강/Dive, 수평, 선회, 자동활공, 경사지 이착륙 등 각 기동 수행시 속도, 고도, 하중 배수, ROC, 조종 입력량 등 목표 값에 도달 시 하중 측정 했으며 기 수행된 결과와 동등 수준임을 확인 하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 한국형 기동헬기사업에서 국산화된 블레이드 생산 공정의 단점을 보완하기 위해 신규장비(Robot, Heat-Mold)를 적용한 내용을 기술하였다. 개발과 달리 양산은 장시간에 걸쳐 많은 블레이드를 안정적으로 신뢰성 있게 생산해야한다. 이를 위해 블레이드 생산의 핵심공정인 적층공정과 경화공정에 들어가는 장비인 로봇과 Heat-Mold를 설계 및 개발하였고, 이에 대한 검증을 위해 Short-Beam, Tg test를 수행하였다. 또한 Heat-Mold의 열상승률을 개발 장비와 비교하여 신규 장비의 성능을 검증 하였다. 마지막으로 신규 장비를 이용하여 생산된 블레이드를 개발에 준하는 시험을 실시하였고, 그 결과는 Table 4와 같이 개발과 동등 이상의 성능이 나오는 것을 확

Table 4. Performance Test Result

구분		시편 수량	시험 결과 (개발 대비)
PPV		3ea	동등 수준 이상임.
피로 시험	1차	2ea	동등 이상 수준임.
	2차	2ea	동등 이상 수준임.
기본 물리량 측정	윤곽	1ea	검사기준 만족, 동등 수준임.
	강성		동등 수준임.
	단면		동등 수준임.
동특성	Modal	1ea	동등 수준임.
	Whirl	4ea	동등 수준임.
비행 시험	진동	4ea	동등 수준임.
	성능		동등 수준임.
	하중		동등 수준임.

인하였다. 본 장비의 적용을 통하여 신뢰성 있고, 안정적인 블레이드 생산 공정을 구축할 수 있다. 항공기 성능을 좌우하는 핵심 구성품인 블레이드 양산 생산 공정을 국내 최초로 구축함으로서 향후 진행되는 헬기 사업에 크게 기여할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 수리온 초도양산 사업의 일환으로 수행되었습니다. 관련 기관의 도움에 감사드립니다.

References

1) BLADE, ROTARY WING, Korea Defense Standard KDS 1615-4001, 2013

2) Process and Quality Control of Main Rotor Blade Composite Assembly Parts, *A88MP6301*, 2010.

3) Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, *ASTM D 2344*, 2006.

4) Standard Test Method for Glass Transition Temperature(DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by DYnamic Mechanical Analysis(DMA), *ASTM D 7028*, 2008.