

냉방기용 송풍 Blade 의 피로특성 평가

Fatigue-characteristic Evaluation of a Ventilating Blade in the Air-conditioner

최정훈¹, 구재민², 석창성^{2,✉}, 김종학³, 장성용⁴
Jung-Hun Choi¹, Jae-Mean Koo², Chang-Sung Seok^{2,✉}, Jong-Hak Kim³ and Sung-Yong Chang⁴

1 성균관대학교 기계공학부 일반대학원 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

2 성균관대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

3 캐리어 에어컨 (Associate/Light Commercial Eng. Team, Career Ltd. Korea)

4 한국 전력공사 전력연구원 수화력 발전연구소 (Power Generation Laboratory, KEPCO Research Institute)

✉ Corresponding author: seok@skku.edu, Tel: 031-290-7446

Manuscript received: 2009.12.11 / Revised: 2010.4.16 / Accepted: 2010.6.10

The fatigue characteristic of a material or a structure is derived from fatigue tests of standard specimens. However, many test results of standard specimens are very different from those of real structures. One reason for this difference is the constraint effects according to the geometrical difference. Therefore, to calculate more accurate fatigue life, the constraint effect must be considered by comparing test results of standard specimens with those of real structures. In this study, a blade of an air-conditioner was evaluated by both the test and the analysis. The results showed that a standard specimen is conservative, compared with a structure specimen. And fatigue life of an air-conditioner's blade was predicted from those.

Key Words: ABS (아크릴로니트릴/부타디엔/스티렌), HIPS (내충격용 폴리스티렌), Fatigue (피로)

기호설명

σ_v = von-Mises stress

T-N = Moment-life

1. 서론

일반적으로 기계 구조물은 응력 진폭이나 평균 응력이 변하는 변동하중을 받는 경우가 많으므로, 이러한 응력 하에서의 피로강도(fatigue strength) 및 피로수명(fatigue life) 예측은 실제 설계에 있어서 대단히 중요한 요인이 된다.¹ 이는 항공기나 자동차 또는 각종 발전설비 및 플랜트를 비롯하여 우리의 실생활에서 흔히 사용하고 있는 사무기구나 가전제품 등에 이르기까지 피로파괴가 차지하는 비율이 점차 늘어나고 있는 데에서 잘 알 수 있다.

이러한 피로에 의한 파손사례를 보이는 예로 에어컨의 경우를 들 수 있다. 에어컨은 실내의 쾌적한 공기조화를 목적으로 냉방, 공기순환 및 정화 등의 기능을 하는 가전기기로서 최근 국내의 생활수준이 향상되고 도시기능의 고도화에 따른 기후 온난화의 영향으로 그 수요가 급격히 증가하고 있다. 이 가운데 에어컨을 구성하는 구조물인 Blade 는 에어컨의 작동 정지 시 완전히 닫히게 되는데, 이때 원래의 회전토크보다 더 큰 오버토크(over torque)가 발생됨으로써 Blade 의 힌지부에 비틀림 하중이 가해지게 된다. 또한 이러한 개폐과정의 반복됨에 따라 비틀림 반복응력으로 인해 힌지부 내에서의 소성 영역이 발생하게 되어 결국 피로파괴가 발생된다.

따라서 본 연구에서는 Blade 재료의 물성평가를 수행하여 재질에 따른 파괴거동을 관찰하고,

이를 통해 Blade 실 구조물의 피로시험을 수행함으로써 정량화하였다. 또한 이와 함께 Blade 형상 모델에 대한 FEM 해석을 수행하여 최대응력 집중부 및 취약부에 대한 응력분포를 확인하였고, 그 결과를 비교·분석하여 에어컨 Blade 의 응력(S)-수명(N)선도 및 그에 따른 상관관계식을 유도함으로써 Blade 의 피로 특성 평가를 수행하였다.

2. 시험 및 해석

2.1 시험편 및 시험장비

본 시험에 사용된 Blade 시편의 재료는 ABS 수지와 HIPS 수지로서, Table 1 에 총 4 가지 재질로 구성된 시편을 분류하였다.

우선, ABS 수지는 Acrylonitrile, Butadiene, Styrene 의 3 성분으로 되어 있는 일종의 내충격 열가소성 수지의 총칭으로 종합 Engineering Plastics 이라고도 한다. ABS 수지에 있어서 A/B/S 의 조성은 이론적으로 무한히 변화시켜 생산가능하나 통상 (A/B/S=20-30/5-40/-70%의 범위) 내에서 실용적으로 필요한 성질을 갖도록 하고 있다.

한편, HIPS(High Impact Polystyrene)는 스티렌에 고무를 5~10% 첨가하여 제작한다. HIPS 의 재료물 성치는 고무상의 입자 크기와 함량, 고무와

기질(matrix)의 접합 강도, 균질성에 크게 의존한다. 이들 ABS 및 HIPS 재료는 재질에 따른 차이는 있으나 공통적으로 우수한 기계적 성질과 가공성, 주조성을 갖고 있으며, 또한 매우 우수한충격 강도와 내열성을 갖고 있다. 또한 이들 재료의 가공품은 일반적으로 가전 제품의 부품이나 하우징(housing), 사무용 기기 등에 쓰인다. 인장시험에 사용된 시편의 형상을 Fig. 1 에 나타내었다. 시험장비로는 시마즈(Shimadzu)사의 25ton 용량 전기모터식 시험기(model AG-25TG)를사용하였고, 표준 시험편 피로시험에 사용된 시험기는 인스트론(Instron)사의 25ton 용량 전기 유압식 재료시험기(Instron model 1332)를 사용하였다.

또한 Blade 구조물에 대한 비틀림 파괴시험 및 피로시험을 수행하기 위하여 0.1ton 용량 전기유압식 재료시험기(Instron model 8841)를 사용하였다.

비틀림 시험장치 및 설치된 지그의 형상은 Fig. 2 에 나타내었고, 시험에 사용된 Blade 구조물의 형상은 Fig. 3 에 나타내었다.

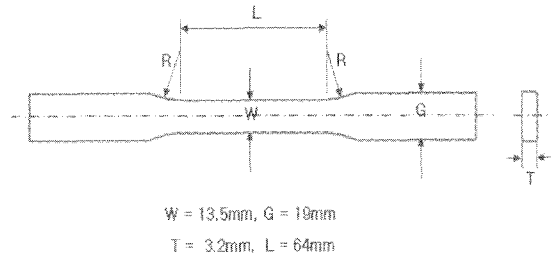


Fig. 1 Appearance of a tensile test specimen

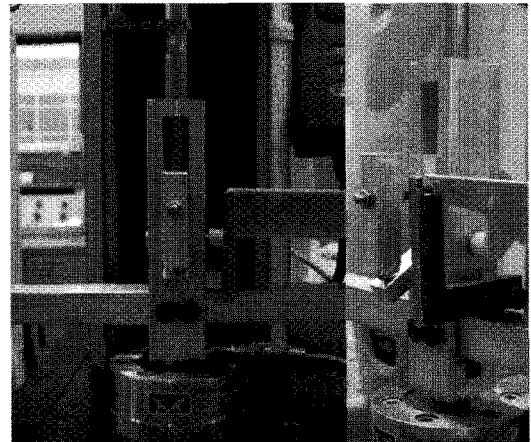


Fig. 2 Experimental setup for torsional fracture and fatigue test

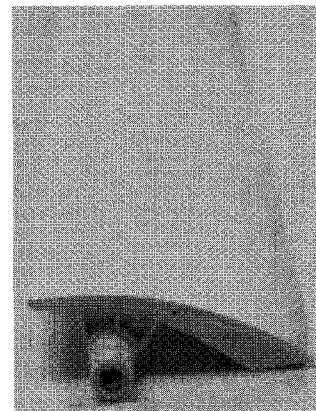


Fig. 3 Appearance of an air-conditioner's blade

Table 1 Classification of specimens

Resin	ABS		HIPS	
	ABS-HG	ABS-HF	HIPS-HG	HIPS-HR
Blade	ABS-HG	ABS-HF	HIPS-HG	HIPS-HR

2.2 표준시험편의 인장 및 피로시험

ASTM E8²과 ASTM D638³의 기준을 만족하도록

록 인장시험을 수행하였다. 3mm/min 의 시험 속도로 상온에서 시험을 수행하였으며, 본 시험편의 재료가 압축과 굽힘에 민감하므로 시험기와 시험편의 축 정렬과 하중제어에 주의하였다.

ASTM D638 에 의거하여 피로시험을 실시하였으며, 시험조건으로는 탄성구간에서 하중비 R=0.1 에 주파수 8Hz 의 피로시험 조건을 적용하여 1,000,000 cycle 에서 미파단 시험편이 발생할 때까지 하중을 변화시켜가며 시험을 수행하였다.⁴

2.3 실 구조물 비틀림 피로시험

에어컨 Blade 는 stepping motor 에 부착된 shaft 를 Blade 힌지에 삽입 후 적정 토크를 가함으로써 풍향을 조절하는 구조물로 시험에 앞서 이와 동일한 구속조건을 구현할 필요가 있다.

이에 본 연구에서 대상으로 하고 있는 에어컨 Blade 의 구동조건을 분석하여 시험 지그를 제작하였다. 우선 힌지부에 shaft 를 삽입 후 chuck 과 link 를 볼트로 체결하였고, Blade 힌지부가 비틀림 모멘트를 받는 환경을 모사하기 위하여 stopper 를 지그 몸체에 연결시켜 비틀림 모멘트를 발생시켰으며, 베어링을 이용하여 하중 재하에 따른 편심을 방지하였다.

피로시험은 ABS 및 HIPS 의 각 대표재질(ABS-HG, HIPS-HG)을 선정하여 시험을 수행하였으며, 하중비 R=0.1, 3Hz 로 1,000,000 cycle 까지의 미파단 시험편이 발생할 때까지 하중을 변화시켜가며 비틀림 피로시험을 수행하였다.

2.4 FEM 을 이용한 힌지부의 비틀림 해석

에어컨 블레이드의 FEA 모델을 구성한 후 정하중 시험과 동일한 경계조건을 부여하여 유한요소 해석을 수행하였다. 상용 모델링 프로그램인 I-DEAS ver. 11 을 이용하여 모델 및 유한요소망을 구성하였으며, ABAQUS ver. 5.8 을 사용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 한편, Fig. 4 와 같이 주요 관심부인 블레이드의 힌지부를 포함하여 해석모델을 단순화하였다. 4 절점 솔리드 요소(C3D4 Element)를 적용하였으며, 80,667 개의 요소에 절점수는 18,887 개이다. 해석에는 제일모직사의 STAREX 물성표를 참고하여 각 재질에 대한 물성치로 사용하였다.

본 해석에는 구조물 비틀림 피로시험에 사용된 비틀림 모멘트를 블레이드 의 해석 모델에 대해 동일하게 부과하였고, 최대응력을 정량적으로 평가하기 위해 탄소성해석을 수행하였다. Fig. 4 는 단

순화된 블레이드 힌지부의 경계조건 및 요소망 구성형태를 나타낸 것으로서 실제 비틀림에 의한 시험조건과 동일하게 블레이드의 뒷면에 대해 x 축 방향으로 변위를 구속하였으며, y 축 및 z 축을 회전방향에 대해 구속하였다. 또한 블레이드와 stopper 가 맞닿는 곳에는 y 축 방향으로 변위를 고정하였다. 한편 shaft 와 블레이드 힌지의 접촉면간에는 서로 상대운동이 존재한다고 가정하는 일반적인 contact 조건을 적용하였으며, shaft 의 원둘레에 크기가 같고 방향이 반대인 우력을 부가함으로써 비틀림 모멘트를 생성하였다.

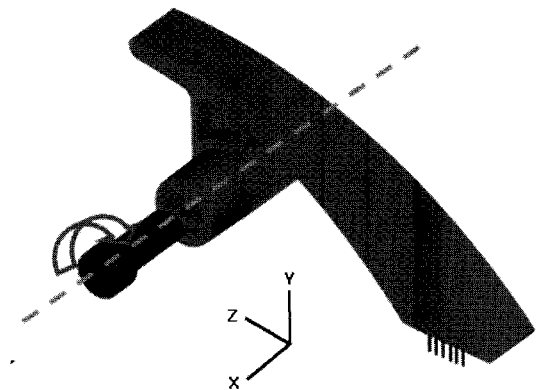


Fig. 4 Operating condition of an air-conditioner's blade

3. 결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과 및 고찰

상온 인장시험에서 얻은 하중-변위 선도로부터 공칭응력-공칭변형률 선도를 구하였다.

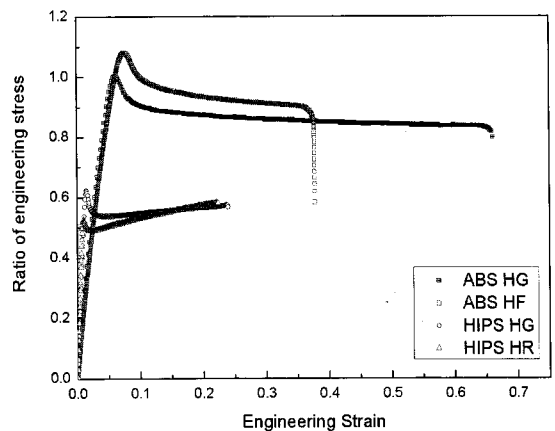


Fig. 5 Engineering stress-strain curves

Table 2 Tensile test results

Materials	Method	Speed	Tensile Strength (ratio)
ABS-HG	ASTM D638	3 mm/min	1
ABS-HF			1.1
HIPS-HG			0.64
HIPS-HR			0.53

Fig. 5 에 ABS 및 HIPS 에 대한 블레이드 4 종 재질의 선도를 나타내었으며, 그 결과를 Table 2 에 나타내었다. 시험 결과, ABS 계열이 HIPS 계열에 비해 약 1.5 ~ 2 배가량 높은 인장강도를 나타내었으며, 그 중 ABS-HF 가 가장 강도가 높은 것으로 평가되었다. 총 연신율 또한 HIPS 계열에 비해 ABS 계열에서 높은 거동을 보였으며, 약 1.6~3 배가량의 차이를 보였다.

3.2 표준시험편 피로시험

표준 시험편 피로시험은 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 총 4 가지 재질별로 각각 6~9 개의 시험편을 이용하여 피로시험을 수행하였다. S-N 선도의 기울기에 의한 ABS 계열 및 HIPS 계열의 10⁶ cycle 피로한도는 ABS 계열이 HIPS 계열에 비해 높은 것으로 나타났다. 또한 각 계열별 구성성분(HF-HG and HG-HR) 에 의한 영향은 미미하여 피로수명에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다.

3.3 구조물 비틀림 피로시험

시험 결과, Fig. 7 과 같이 비틀림 피로시험에 따른 비틀림 모멘트(T)-수명(N) 선도를 얻었다. 각 선도의 기울기는 대체적으로 유사하며 HIPS 계열에 비해 ABS 계열의 T-N 선도가 보다 높게 나타났다.

파손의 형태는 각 형상별로 (가) ~ (다)군으로 나뉘어지는데, 균열개시와 진전으로 인한 파손의 양상은 대부분이 힌지부 우측 하단부에서 균열의 발생 및 진전으로 인해 파손됨을 확인하였다.

3.4 유한요소 해석 결과

Fig. 8 은 유한요소해석 결과로써 von-Mises 응력 상태를 나타낸 것이다.

이를 통해 힌지 내부의 우측 하단부에 위치한 shaft 끝단과 맞닿는 지점에서 최대응력이 발생하

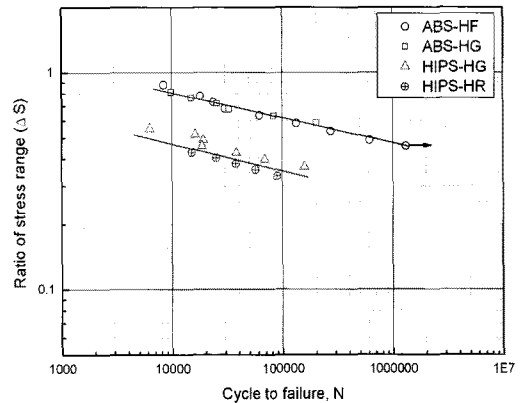
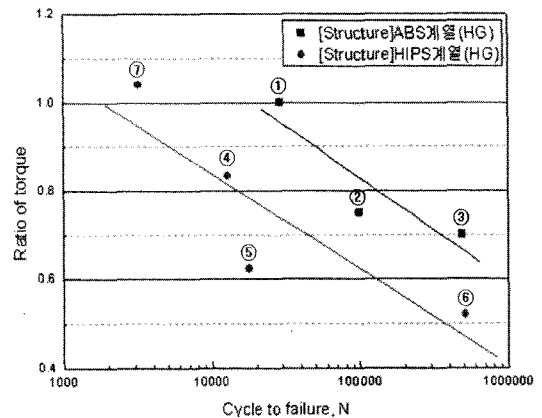
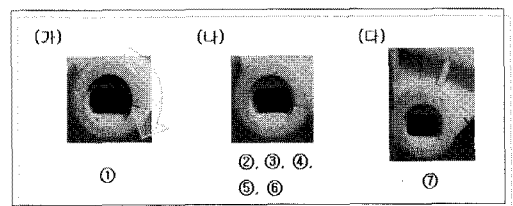


Fig. 6 S-N diagram



(a)



(b)

Fig. 7 Graph of torque-life and fractured specimens

는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 블레이드 비틀림 피로파괴시험의 파손양상과도 일치한다. Fig. 9 에 블레이드의 표준시험편과 실 구조물의 S-N 선도를 비교하여 나타내었다.

각 선도는 시험편의 형상 (구조물 vs. 표준시험편)과는 상관없이 ABS 재질로 구성된 시험편이 HIPS 에 비해 피로한도가 높게 나타났다. 또한 그에 따른 기울기는 두 형상별로 각기 다른 경향을 보였는데, 이는 표준시험편과는 달리 구조물 시험

편의 경우 형상에 의한 영향으로 판단된다.
 각 계열의 경사부 회귀식은 ABS 계열이

$$\sigma = 10^{1.678} \times N^{-0.067} \quad (1)$$

이며, HIPS 계열이

$$\sigma = 10^{1.583} \times N^{-0.073} \quad (2)$$

로써, ABS 계열이 HIPS 계열의 선도보다 높게 나타났다.

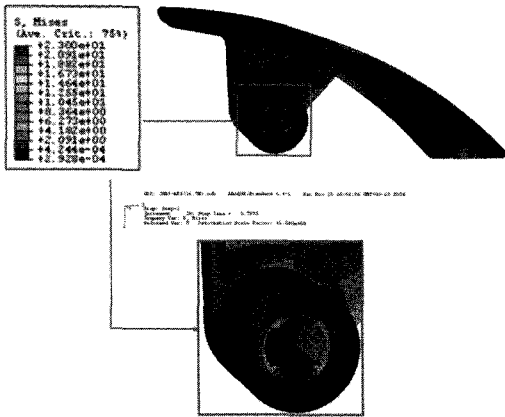


Fig. 8 Distributions of Maximum principal stresses

이에 따른 10^6 cycle 피로한도는 HIPS 에 비해 ABS 계열이 1.6 배 가량 높은 것으로 평가되었으며, 두 재질에 대해 동일 응력 대비 수명을 분석한 결과, 전체적으로 표준시험편이 구조물 시험편에 비해 보수적인 것으로 나타났다.

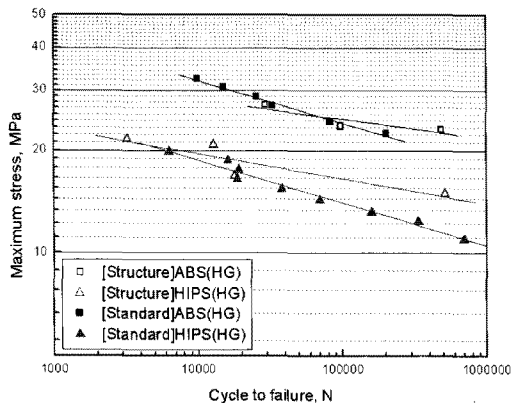


Fig. 9 S-N curves of air-conditioner's blades

4. 결론

(1) 블레이드 재질에 대한 인장시험 결과, ABS 계열이 HIPS 계열에 비해 약 1.5 ~ 2 배 가량 인장강도가 높은 것으로 평가되었다.

(2) 표준시험편의 피로시험 결과 각 계열별 구성성분(HF, HG 와 HQ, HR)에 의한 영향은 미미하여 피로수명에 큰 영향을 끼치지 않았다.

(3) 블레이드 구조물의 비틀림 해석 결과, 최대 응력은 힌지 내부의 우측 하단부에 위치한 shaft 끝단과 맞닿는 지점에서 발생하였으며, 이는 피로시험의 파괴양상과도 일치하였다.

(4) S-N 선도는 시험편의 형상(구조물시험편 대 표준시험편)과는 상관없이 ABS 재질로 구성된 시험편이 HIPS 에 비해 피로한도가 높게 나왔다. 또한 전체적으로 표준시험편이 구조물시험편에 비해 보수적인 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2 단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업, 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2007-0055842).

참고문헌

1. Lee, Y. B., Chung, C. S. and Cho, N. I., "A Study on Fatigue Behavior Considering Effects of Redistributing Tensile Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment," Trans. of KSME(A), Vol. 20, No. 7, pp. 2234-2245, 1996.
2. ASTM Standard E8, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standards, ASTM Philadelphia, 2002.
3. ASTM Standard D638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," Annual Book of ASTM Standards, ASTM Philadelphia, 2000.
4. Barsom, J. M. and Rolfe, S. T., "Fracture and Fatigue Control in Structures (3rd Edition)," Butterworth-Heinemann, pp. 163-172, 1999.
5. Castellani, L., "Rate and temperature dependence of fracture toughness in ABS resins in relation to dispersed-phase structure," Polymer, Vol. 37, No. 8, pp. 1329-1338, 1996.

6. Park, J.-S., Seok, C.-S., Lee, J.-G. and Lee, J.-H., "Fatigue Characteristic of HIPS (HR-1360) Materials," Proc. of KSME Autumn Conference (A), pp. 129-134, 2000.
7. Boldizar, A. and Möller, K., "Degradation of ABS during repeated processing and accelerated ageing," Polymer Degradation and Stability, Vol. 81, No. 2, pp. 359-366, 2003.