

〈技術論文〉

홀로그래피 간섭법을 이용한 터빈 블레이드의 미소변형 측정

권영하* · 박승옥** · 강대임***

(1990년 1월 17일 접수)

Deformation Measurement of Turbine Blade by Using Holographic Interferometry

Y. H. Kwon, S. O. Park and D. I. Kang

Key Words: Holographic Interferometry(홀로그래피 간섭법), Turbine Blade(터빈 블레이드), Fringe Pattern(간섭무늬), Centrifugal Force(원심력), Bending Force(굽힘력), Tension Force(인장력)

Abstract

The failure of turbine blade is due to fatigue caused by centrifugal force, bending force and unusual vibration. The analysis of deformation and stress is very important to design turbine blade without stress concentration and to analyze the cracked blades. In this study the deformation analysis of turbine blade applied by static tensile force and bending force are carried out. The real time holographic interferometry technique is employed to detect the very small amount of deformation. The special designed loading frame (50 kN capacity) and the bending force system by using deadweights are installed on the optical table.

1. 서 론

터빈 블레이드가 회전을 하게되면 힘을 받게되어 변형이 생기고 응력이 발생한다. 특히 발생된 응력이 터빈 블레이드의 한부분에 집중될 경우에는 파손의 원인이 된다. 터빈 블레이드에는 여러가지의 힘이 종합적으로 미치게되나 직접 파손의 원인이 되는 힘의 종류는 다음과 같다⁽¹⁾.

첫째는 터빈 블레이드가 일정한 반지름을 가지고 회전축을 중심으로 고속회전하여 발생하는 원심력(centrifugal force)으로 인장응력이 터빈 블레이드 전체에 걸리게 된다. 둘째는 증기가 분사되는 힘이 직접 터빈 블레이드에 부딪혀서 터빈 끝이 고정된

상태에서 굽힘력이 일정하게 작용하여 전체적으로 힘을 받게된다. 다음으로는 회전하고있는 물체가 여러가지 원인에 의해서 예기치 않은 진동이 발생하여 터빈 블레이드에 충격을 주게되는 예측할 수 없는 힘을 들수 있다⁽²⁾.

이와같은 터빈 블레이드에 작용하게 되는 힘들의 해석은 터빈 블레이드의 파손원인을 분석할 경우나 설계할때 반드시 이루어져야 한다. 즉 파손부위에 어떤 방향의 힘이 어느정도의 양이 가해질때 어떠한 변형 및 파손이 일어나는지를 파악해서 터빈 블레이드를 설계하여 응력의 집중과 변형이 가능한한 적게 일어나도록 해야 한다.

실험적으로 응력을 해석하는 방법에는 스트레인 게이지법, 광탄성법, 모아레 간섭법, 홀로그래피 간섭법등이 있다^(3~5). 홀로그래피 간섭법(holographic interferometry)은 외부에서 힘을 가할수 있는 장치를 구성하여 터빈 블레이드에 변형을 가하

*정회원, 한국표준연구소 힘연구실

**한국표준연구소 분광색채연구실

***한국표준연구소 힘연구실

고 레이저를 사용하여 재생된 3차원 영상위에 간섭 무늬를 형성하는 것이다. 미소변형 측정을 위하여 널리 사용되고 있는 홀로그래피 간섭법에는 이중노출법(double exposure) 실시간법(real time) 시간평균법(time average)의 3가지가 있으나⁽⁶⁾, 본 연구에서는 실시간법을 사용하여 터빈 블레이드가 회전할때 받는 원심력과 굽힘력에 의한 변형을 측정하였다.

2. 실험장치

2.1 광학장치의 구성

본 실험장치의 구성도는 Fig. 1과 같고, 이에 따라 설치된 시스템의 장치사진이 Fig. 2에 나타나 있다. 홀로그래피 3차원 영상을 만들기 위해서 모든 광학 부품들을 무진동 테이블 위에 설치하였다. 무진동 광학테이블을 900mm×1800mm의 두꺼운 철판에 50mm 간격으로 나사홈이 가공되어 있으며, 타이어 튜브에 공기를 넣어 외부진동을 분리시켰다. 12mW 출력의 He-Ne레이저에서 나오는 빛을 variable beam splitter를 사용하여 물체 파

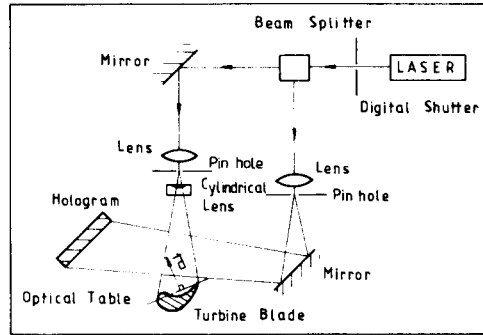


Fig. 1 Schematic diagram of holographic system on the optical table

(object beam)와 기준파(reference beam)의 세기를 원하는 비율로 나누었다. 나뉘어진 빛은 각각 현미경 대물렌즈와 바늘구멍으로 구성된 빛 확산기로 퍼트렸으며, 물체파는 다시 원통렌즈(cylindrical lens)를 사용하여 원통형으로 퍼지게 하여 Fig. 3에 나타난 두가지 모양의 터빈 블레이드 크기에 맞게 빛의 모양을 조절하였다.

홀로그램을 고정시키는 장치는 일반적으로 스프

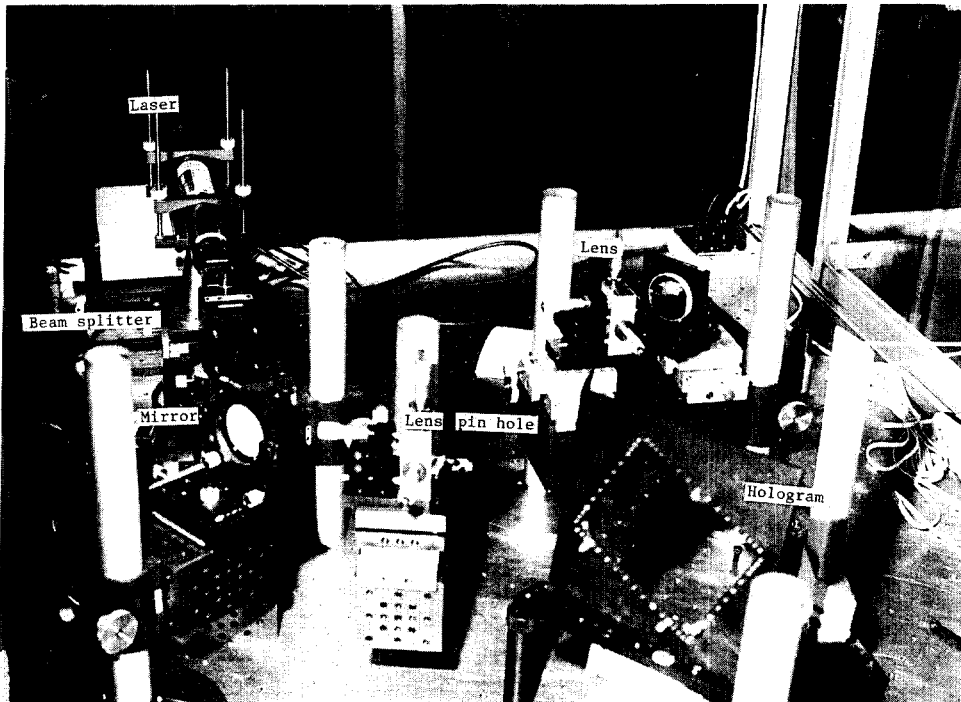


Fig. 2 Photograph of holographic system

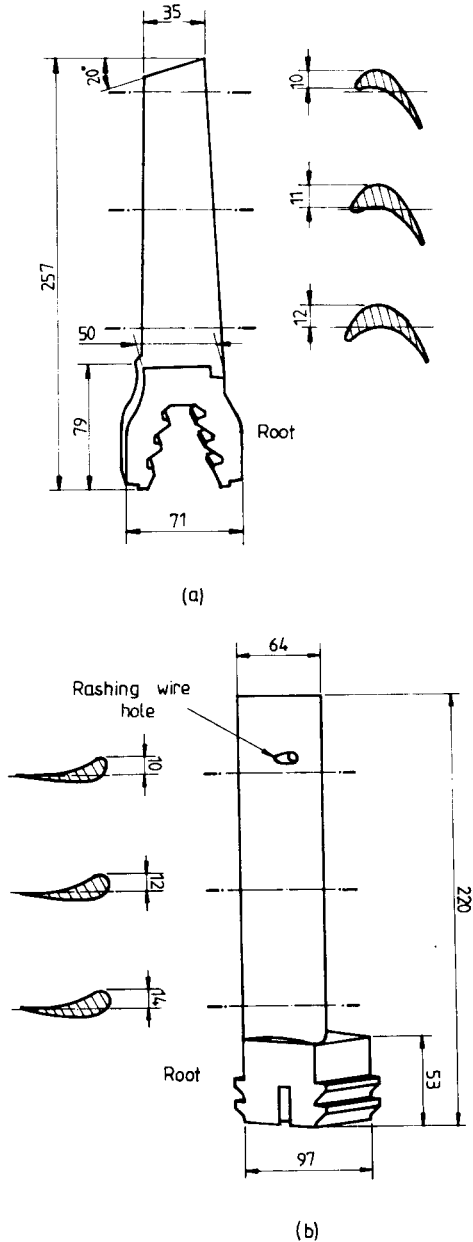


Fig. 3 Shapes of turbine blades

링을 사용하고 있으나 필름을 현상, 정착시킨후 원래의 위치에 정확히 놓아야 하는 실시간법을 적용하기 위해서 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 특수한 홀로그래프 고정장치를 제작하였다. 3개의 볼을 사용하여 유리필름판을 받쳐주고, 3개의 핀에 의해서 필름이 고정되도록 하였다.

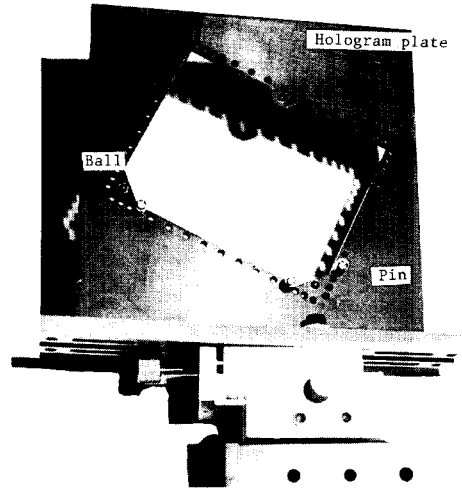


Fig. 4 Photograph of hologram plate holder for real time holographic interferometry

2.2 외부힘을 가하는 장치의 제작

터빈 블레이드가 회전할때 받는 원심력에 의한 변형을 측정하기 위하여 Fig.5와 같은 50 kN 용량의 힘 발생장치(loading frame)를 제작하였다. 동력으로는 AC모터를 사용하였고 기어박스에 의해서 힘이 전달 되도록 설계하였으며 4개의 지지대로 아래, 윗판을 지지시키고 모터와 기어박스는 윗판에 설치하였다. 힘의 크기를 조절할수 있도록 본 연구실에서 제작한 50kN용량의 로드셀(정밀도:1/5000)을 힘이 가해지는 축에 설치하여 시편에 전달되는 인장력(tension force)과 압축력을 측정할수 있도록 설계하였다. 터빈 블레이드를 힘발생장치에 고정시키기 위하여 터빈 블레이드 뿌리부분을 고정시킬수 있는 원형의 홈을 뿌리부분과 맞추어서 제작하고, 밑판에 나사로 고정하였으며 윗부분은 용접하여 부착 연결하는 방법을 사용하였다.

굽힘력(bending force)에 의한 변형을 측정하기 위해서는 Fig. 6과 같은 지그를 제작하였다. 실제로는 일정한 힘을 표면 전체에 받아 굽힘이 일어나지만 그와 같은 장치의 구성에는 많은 어려움이 따르므로 외팔보로 가정하여 한쪽을 고정시키고 다른 쪽에 힘이 작용하도록 설계하였다. Fig. 6에서와 같이 힘은 추에 의해서 가해지며 쇠줄로 전달되도록 하였다. 추의 질량과 중력가속도에 의해서 발생된 힘은 굽힘방향과 수직으로 작용하므로, 지지대와 회전판을 사용하여 거의 힘의 손실없이 터빈 블

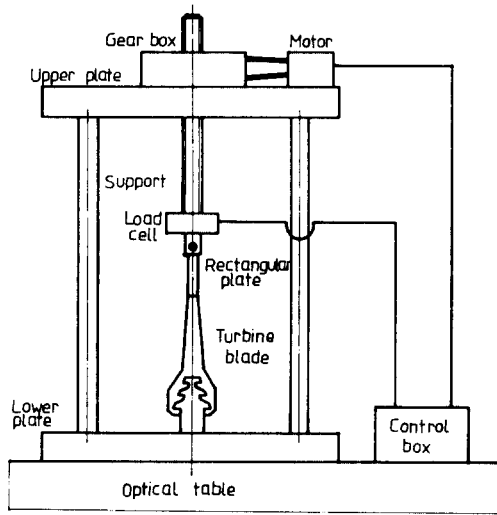


Fig. 5 Loading frame system on the optical table

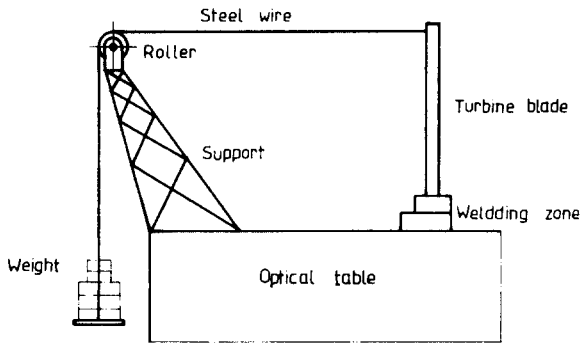


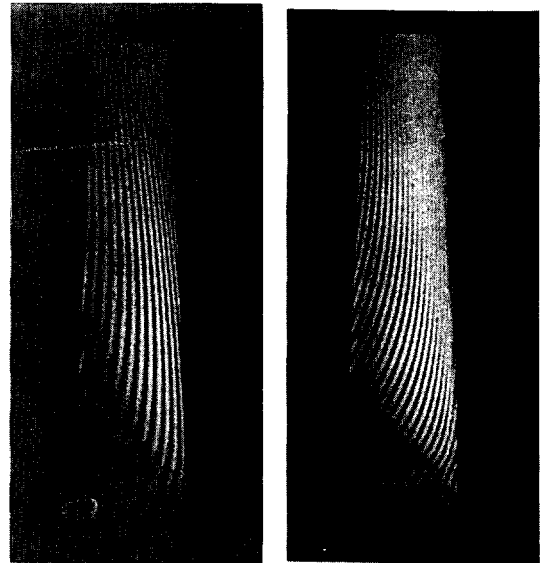
Fig. 6 Bending load system for turbine blade on the optical table

레이드에 전달되도록 하였다. 전달된 힘은 2개의 쇠줄로 터빈 블레이드 양편으로 나누어 지게하여 힘의 집중을 막았으며, 터빈 블레이드의 밑부분은 용접을 하여 이론적으로 고정되도록 설계하였다. 이때 사용된 추는 정확하게 질량보정된 것을 사용하였으며 회전판의 마찰은 고려하지 않았다.

3. 실험방법 및 결과

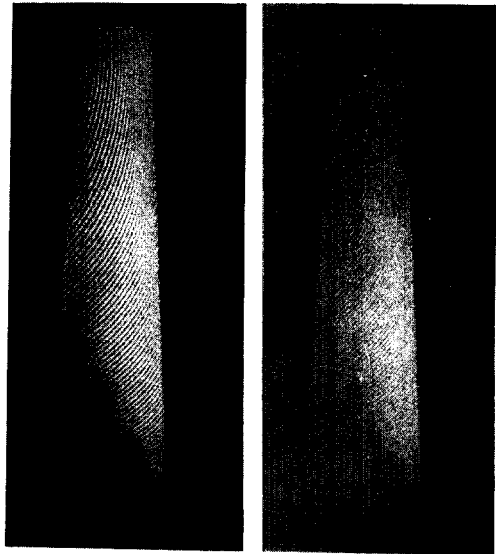
3.1 인장력에 의한 변형 측정

Fig. 7은 Fig. 2의 실험장치에 Fig. 3(a)의 터빈 블레이드를 놓고 실험한 결과이다. 변형전의 상태를 기록한 홀로그래를 제자리에 놓고 다시 터빈 블레이드에 힘을 가하면서 실시간 간섭무늬를 얻었



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. 7 Fringe patterns formed according to the magnitude of tension force (a) 300 N, (b) 570 N, (c) 1290 N, (d) 1560 N

다. Fig. 7의 (a), (b), (c), (d)는 각각 300 N, 570 N, 1290 N, 1560 N의 힘을 가했을 때이다. 힘이 증가함에 따라 변형이 증가하여 간섭무늬의 수효 및 밀도가 증가함을 볼 수 있다. 또한 터빈 블레이드에 인장력이 가해지면 일정한 힘이 전체에 고르게 작용되나 원래 터빈 블레이드의 형태가 심

하게 비틀려 있어서 간섭무늬가 전체적으로 휘어지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 힘이 증가함에 따라 심해지며, 윗면이 밑부분보다 얇고 좁으므로 밑부분보다는 위부분이 더욱 뒤틀리는 것을 볼 수 있다.

3.2 굽힘력에 의한 변형 측정

Fig. 6의 장치를 Fig. 2의 실험장치에 설치하여 Fig. 3(b)의 터빈 블레이드가 굽힘력을 받을 때 발생하는 변형을 측정하였다. Fig. 8의 (a), (b), (c), (d), (e)는 5 N부터 25 N까지 5 N마다 5단계

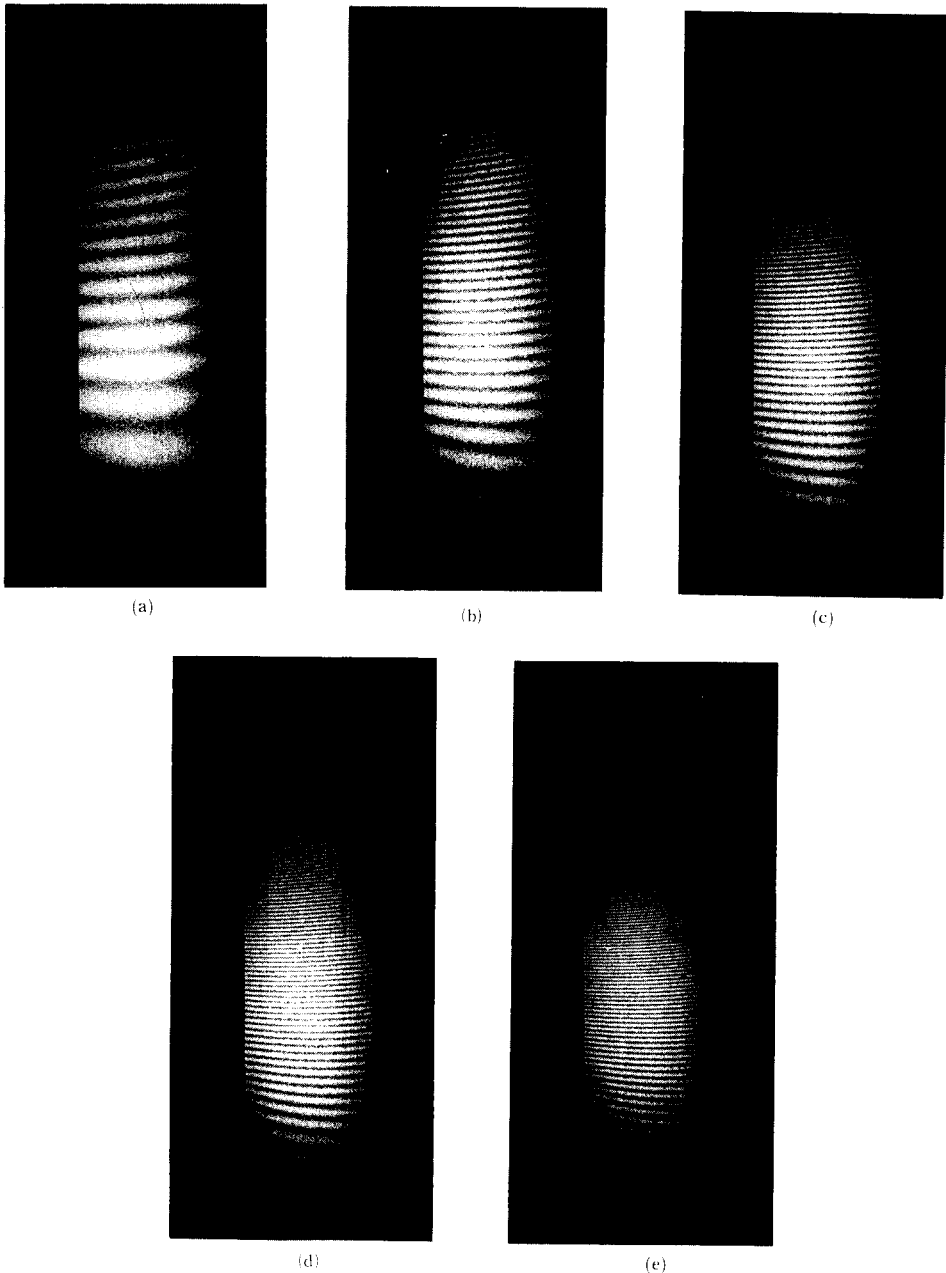


Fig. 8 Fringe patterns formed according to the magnitude of bending force (a) 5 N, (b) 10 N, (c) 15 N, (d) 20 N, (e) 25 N

로 나누어서 힘을 가함에 따라 얻어진 간섭무늬의 변화를 나타내고 있다. 굽힘력이 증가할수록 간섭무늬가 많아지고 무늬간격이 좁아짐을 볼 수 있다. 터빈 블레이드의 단면이 Fig. 3(b)와 같이 위치에 따라 다른 모양을 하고 있으므로 부분에 따라 굽힘의 정도가 다르게 나타난다.

터빈 블레이드에 굽힘이 일어나게 되면 rashing wire hole 주위에 응력이 집중되므로 주변의 간섭무늬 밀도가 높게 나타날 것으로 예상하였으나 전혀 그와 같은 현상은 발견되지 않았다. 이로 부터 터빈 블레이드의 설계시 rashing wire hole에 의한 응력집중이 생기지 않도록 고려하였음을 알 수 있다. 또한 뿌리부분은 고정받침과 용접되어 있으므로 전혀 굽힘이 일어나지 않았음도 볼 수 있다.

4. 간섭무늬의 정량적인 해석 및 고찰

홀로그래피 간섭법에 의해 얻은 간섭무늬를 수학적으로 해석함으로써 물체의 변형을 정량적으로 측정할 수 있다. Fig. 9는 홀로그래피 간섭법으로 얻은 간섭무늬의 간격에 대해 일어난 변형을 기하학적으로 설명하기 위한 그림이다. 빛의 경로가 A에서 한점 C에 도달하여 B로 가서 홀로그래피에 기록되었다고 가정하자. 이때 점 C가 C'로 거리 d만큼 이동하게 되는 면외변위를 발생시키고 동일한 사진건판에 홀로그래피를 이중으로 기록하여 간섭무늬를 얻게 되면 다음과 같이 해석을 할수있다⁽⁷⁾.

$$l_A = d \cos \beta, \quad l_B = d \cos \gamma \quad (1)$$

$$n = \frac{l_A + l_B}{\lambda} = \frac{d(\cos \beta + \cos \gamma)}{\lambda} \quad (2)$$

그러므로

$$d = \frac{n\lambda}{\cos \beta + \cos \gamma} \quad (3)$$

이때 n은 간섭무늬의 숫자이며 λ는 레이저의 파

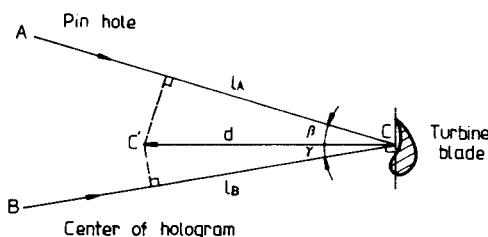


Fig. 9 Trigonometric calculation of holographic interference

장을 나타낸다. 즉 Fig. 1에서 빛이 바늘구멍을 통해서 터빈 블레이드의 중심을 향하여 진행한다고 가정하여 면외 변위의 크기를 해석하였다.

본 연구에서 사용된 He-Ne 레이저의 파장은 0.63 μm이고 Fig. 9에서와 같이 면외 변위 d는 터빈 블레이드 밑부분 단면 양끝을 연결한 직선과 수직인 방향으로 가정하였다. 또한 β와 γ는 가는 실을 바늘 구멍에서 터빈 블레이드의 중심을 지나 홀로그래피의 중앙에 고정시켜서 β와 γ의 합한 각을 구한후 변위 d를 결정하여 측정하였다.

터빈 블레이드가 인장력을 받을때 β와 γ는 각각 23°, 39°로, 식 (3)에 의해 간섭무늬 한칸에 대한 단위변형을 받을때 면외 변위분포를 나타낸 것이다. 단면 A-A'는 간섭무늬의 차수가 9이므로 전체 면외 변위의 크기는 3.33 μm가 되며 단면 C-C'에서는 차수가 14로서 5.18 μm의 면외변위가 발생했음을 측정하였다. Fig. 10의 간섭무늬 분포로부터 폭이 좁은 윗부분에서 면외 변위가 많이 발생한 것으로 보아 비틀림이 큰 것을 알 수 있다.

굽힘력의 크기에 따라 간섭무늬를 나타내고 있는 Fig. 8은 홀로그래피의 중앙과 터빈 블레이드에 힘이 가해지는 방향이 직선을 이루도록 광학장치를 구성하여 얻은 것이다. 이때 β는 24°이며 γ는 0°가 되므로 식 3에 의해서 간섭무늬 한칸에 대한 단위 변위는 약 0.328 μm이다.

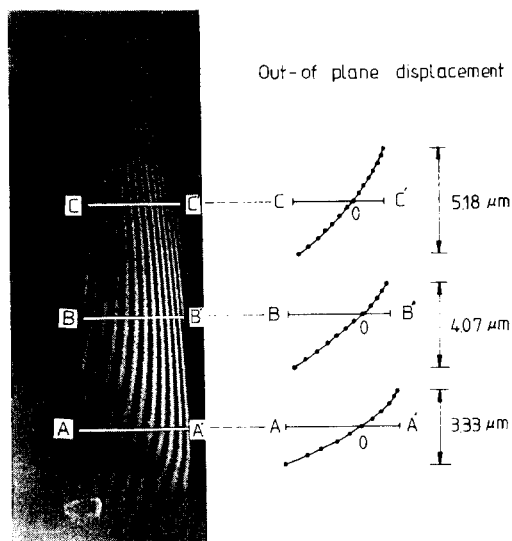


Fig. 10 Out-of plane displacements of turbine blade under tension force

Table 1 Displacements of turbine blade under bending force

Load	5 N	10 N	15 N	20 N	25 N
Fringe number	12	28	46	64	82
Displacement (μm)	3.94	9.18	15.09	20.99	26.09

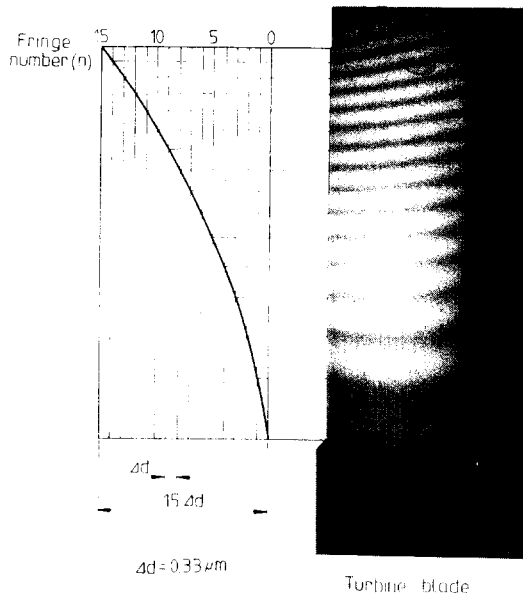
**Fig. 11** Out-of plane displacements of turbine blade under bending force

Table 1은 각 굽힘력에 따른 rashing wire hole 아래부분까지의 간섭무늬 차수와 이에 대한 변위량을 나타내고 있다. Fig. 11은 터빈 블레이드의 왼쪽 얇은 부분의 변형을 정량적으로 표시한 것으로 다른 부분도 동일한 방법으로 해석을 하면 된다.

본 연구에서는 터빈 블레이드가 평판이 아닐뿐 아니라 정확한 형태를 파악할 수 없어 정량적인 스트레인이나 응력을 구하지 않고 Table 1에서와 같이 변위에 대한 해석만을 하였다. 힘의 증가량에 비례하여 간섭무늬 갯수가 증가함을 볼 수 있다.

5. 결 론

홀로그래피 간섭법을 이용하여 터빈 블레이드의 미소변형을 측정하였다. 홀로그래피는 물체의 3차원 영상을 얻을수 있을 뿐아니라, 3차원 영상위에

변형에 의한 간섭무늬를 직접 형성시킬수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 터빈 블레이드가 회전할때 받게되는 인장력과 굽힘력을 임의로 가할수 있는 장치를 고안하여 각각 힘의 증가에 따른 간섭무늬의 변화를 측정하였다. 또한 여러가지 조건을 가정하고 간섭무늬를 수학적으로 해석하여 터빈 블레이드 평면 상 각 지점에서의 변위를 정량적으로 분석하였다.

간섭무늬로부터 인장력에 의해서는 터빈 블레이드가 심하게 뒤틀리는 변형이 일어나고 굽힘력에 대해서는 터빈 블레이드의 뿌리부분이 고정된 상태에서 위로 갈수록 변형이 많이 됨을 알수 있었다.

홀로그래피 간섭법은 여러가지 공학적인 응용이 가능하므로 기존의 실험응력해석 방법이나 수학적 해석으로 불가능한 환경과 모양을 가지는 조건에서도 높은 정밀도를 가지고 이용될 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업의 일부로서 이루어졌으며, 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

- (1) Hesketh, J.A., et al., 1984, "Investigation into the Cause of Failure of Bending on Stage 5LP at KORI 2 Nuclear Power Plant", GEC Turbine Generators Limited, Report No. D. 276.
- (2) Haupt, U., et al., 1982, "Investigation of Blade Vibration of Radial Impellers by Means of Telemetry and Holographic Interferometry", Transactions of the ASME, V. 104, p. 838.
- (3) Kobayashi, A. S., et al., 1987, "Handbook of Experimental Mechanics", Society for Experimental Mechanics, p. 399.
- (4) Sciammarella, C.A. et al., 1984, "The Determination of the Components of the Strain Tensor in Holographic Interferometry", Experimental Mechanics, Dec., p. 257.
- (5) Sollid, J.E., et al., 1978, "Strain from Holographic Data", Experimental Mechanics, Jun., p. 208.
- (6) Taylor, C.E., 1982, "Manual of Engineering Stress Analysis", Prentice-Hall, p. 70.
- (7) Abramson, N., 1981, "The making and Evaluation of Holograms", Academic Press.