고압 임펠러 블레이드 레이저 용접부 설계를 위한 유한요소 해석

한 창민* · 최 해운**,*

*계명대학교 대학원 기계공학과

**계명대학교 기계자동차공학부

FEM Analysis of the High Pressure Applied to an Impeller Blade During Laser Welding

Chang Min Han* and Hae-Woon Choi**,*

*Graduate School of Mechanical Engineering, Keimyung Univ., Daegu, 42601, Korea

*Dept of Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ., Daegu, 42601, Korea

†Corresponding author : hwchoi@kmu.ac.kr

(Received July 1, 2019 ; Revised July 25, 2019 ; Accepted August 6, 2019)

Abstract

Finite element analysis was used to predict the distribution of stress and deformation during laser welding of high speed impellers. FEM was used to analyze three cases, a lower tap fixed (Case I), a lower boundary fixed (Case II) and a lower boundary and upper tap fixed (Case III). As the applied pressure increased, the stress and deformation increased gradually for all cases. In Case III, where the restrained portion was large, the stress was much higher than Case I or II, however the maximum deformation in Case III was smaller than the other cases. The analysis determined that stress was reduced by deformation of a blade tab region that was unrestrained when pressure was applied to the blade. In addition, maximum stress was generated around the tabs, and it was found that the stress was concentrated on the shape of the corner portion. Analysis determined that stress and deformation are inversely proportional. Weld design can be optimized by considering these results. Stress and deformation can be minimized by optimizing the shape of the stressed part using the finite element method, and performing blade design and laser welding design accordingly.

Key Words : Laser welding, Blade analysis, FEM

1. 서 론

차량용 유체클러치 및 유체펌프에서 유체의 압력으로 인해서 회전하는 부품으로 임펠러 블레이드가 있다. 통상적으로 높은 압력을 받음으로 인하여 높은 응력과 변형이 발생하게 되는데, 이러한 블레이드를 용접할 시에는 압력으로 인한 허용응력을 계산하고, 이를 통해서 용접구간(길이 또는 폭) 설계가 이루어져야 한다.

블레이드에 가해지는 외부 힘은 단순 압력뿐만 아니라 원심력에 의한 응력 등 복잡한 형태의 복합응력이 발생하는데, 단순한 이론적 해석방법으로는 예측이 어려워서 컴퓨터를 이용한 전산해석이 사용되고 있다^{1,2)}.

이러한 전산해석적인 구조시험과 유한요소해석을 통하여, 유체기계용 블레이드 뿐만 아니라 다양한 형태의 소형 풍력발전용 복합재 블레이드의 안전성이나, 정격 및 극한 풍속일 때의 블레이드의 해석도 가능하다^{2,3)}.

레이저 용접은 높은 정점출력을 가지는 에너지를 국소 부분에 짧은 시간동안 소입 함으로서 열영향부를 최소화 할 수 있고, 빠른 냉각속도로 인해서 용접 후 변형도 타 용접법에 비해서 최소화 할 수 있는 장점이 있다⁴⁾. 하지만, 고밀도 에너지 용접은 용접부의 냉각속도와 온도구배가 매우 커서 취성조직과 큰 잔류응력을 형성할 수도 있어서 용접설계 전에 용접부 및 모재에 작용하는 응력 및 변형량에 대한 사전검토가 반드시 필요

Fig. 1 3D modeling of impeller blade

하며, 유한 요소법이 효과적으로 사용될 수 있다. 용접 부가 길고 넓어질수록, 용접부위에 작용하는 응력을 상대적으로 줄일 수 있어서 용접신뢰도는 향상되나, 용접 부에 가해지는 열로 인해 변형이 커지는 단점도 있다.

본 논문에서는 Fig. 1에서 예시된 바와 같이 고압이 적용되는 블레이드를 레이저 용접시, 레이저 용접부위 최적설계(부분 용접 vs. 전체 용접)를 통해서 각 조건 별 블레이드가 받는 응력과 변형량을 해석하는 방법 및 결과에 대한 내용을 보고하고자 한다.

2. 본 론

본 연구에서는 레이저 용접시, 블레이드 고정을 위해서 하부 탭 고정 (Fig. 2a), 하부 전 영역 고정 (Fig. 2b), 그리고 하부 전 영역과 상부 탭 고정 (Fig. 2c)의 세 가지 경우를 가정하고, 각각의 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 서로 비교 검증 하였다. 시뮬레이션에 사용된 소재는 AISI 4340이며 상세 물성치는 Table 1에 기술 하였다⁵⁾.

시뮬레이션 조건으로 블레이드가 받는 압력을 1MPa에서 5MPa 범위로 설정하고, 표면에 Normal 한 방향으로 가압방향을 설정하였고, 자유도 구속(constraints)은 x,y,z 방향으로 설정 하였다. 블레이드가 고속으로 회전시 원심력에 의한 응력도 발생되지만, 본 연구에서는 압력 조건의 영향만 고찰하기 위해 원심력에 의한 응력발생은 제외 하였다.

Table 1 Mechanical properties of AISI 4340⁵⁾

Yield strength, MPa	Tensile strength, MPa	Elastic modulus, GPa	Hardness, HV
470	745	190-210	43

(a) Case I

(b) Case II

(c) Case III

Fig. 2 Case study of laser welding simulation

Fig. 2에서는 용접 부를 블레이드 하부 탭 고정(Case I), 하부 전 영역 고정(Case II), 그리고 하부 전 영역과 상부 탭 고정(Case III)으로 구분 하였다.

또한, 소재 파손에 대한 판별조건으로 소재에 가해지는 항복응력과 최대 변형량을 계산하였으며, 이를 위해서 COMSOL Multiphysics Ver. 5.3을 사용하였고, 검증 된 Solid Mechanics 모듈을 적용하였다.

3. 결 과

3.1 응력 분포 (Stress distribution analysis)

소재에 가해지는 압력에 따른 응력분포를 알아 보기 위해서 1MPa에서 5MPa 범위의 유체압력을 블레이드 표면에 가하면서, Von Mises 응력을 계산 하였다. 다양한 압력 하에서의 Von Mises 응력분포 계산하고, 이후 Von Mises 응력이 소재의 허용 항복강도의 초과

Fig. 3 Stress distribution on the blade (Case I, unit MPa)

여부를 관찰하였고, 결과를 Fig. 3에 정리 하였다.

Fig. 3에 나타내 바와 같이, 1MPa의 압력에서는 최대응력이 250MPa 내외로 주로 블레이드 하부 탭 주위에 응력이 집중이 되었다. 이는 압력이 가해질 시에 블레이드 하부 탭의 굴곡부에 응력이 집중이 된 것으로 판단된다. 하지만, 블레이드 표면에는 대부분 100MPa 이하의 상대적으로 작은 응력분포가 발생 되었다.

압력이 3MPa로 상승시에는 블레이드 상하 탭 부분 주위로 점차적으로 응력이 상승하는 것을 볼 수가 있었으며, 최고 압력인 5MPa의 경우에는 전 영역에서 항복강도를 초과하는 응력이 형성됨을 알 수 있었다.

Fig. 4의 경우는 블레이드 하부 영역을 전체적으로

Fig. 4 Stress distribution on the blade (Case II, unit MPa)

구속한 경우이며, 이는 레이저 용접시 하부영역을 전체적으로 집합한 경우를 가정하여 시뮬레이션 한 것이다.

결과에서 나타낸 바와 같이, 1MPa의 압력에서는 최대응력이 250MPa 이상으로 발생 되었는데, 이는 앞선 Case I의 경우와 마찬가지로 블레이드 하부 탭 주위에 응력집중이 발생 되었다.

압력을 3MPa과 5MPa로 더 가하였을 때에도 이러한 응력분포 현상은 비슷한 경향을 보였으며, 전체적으로 응력의 크기만 증가하는 것을 알 수가 있었다.

Fig. 5의 경우, 블레이드 하부 영역뿐만 아니라 상부

(a) Pressure 1MPa

(b) Pressure 3MPa

(c) Pressure 5MPa

Fig. 5 Stress distribution on the blade (Case III unit MPa)

영역의 탭 부분까지 구속한 경우이며, 이는 레이저 용접시 하부영역을 전체적으로 접합한 경우와 더불어 상부 탭 부분을 용접한 사례를 시뮬레이션 한 것이다.

결과에서 나타난 바와 같이, 1MPa에서도 최대응력이 소재의 파단강도 이상으로 발생함을 알 수가 있었다. 다만, 이러한 치명적 응력집중은 블레이드 전 영역 중에서 아주 미소영역에서 발생하였으며, 대부분의 영역에서는 항복강도 이하의 응력이 발생함을 알 수가 있었다. 이러한 결과를 좀 더 세분화하여 살펴 보기 위해서 응력 최대점과 최소 값을 추적하였다.

Fig. 6 Max. and min. stress locations

결과적으로 Fig. 6에서 나타난 바와 같이, 응력 최소 영역은 블레이드 상부 탭의 자유영역이며, 최대영역은 블레이드 상부 탭의 코너부였다. 따라서, 설계시 블레이드 상부 탭의 코너 부위에 응력이 집중 되지 않도록 fillet 등의 천이영역을 두게 되면, 이러한 응력집중에 의한 소재파단을 최소화 할 수 있을 것으로 기대 된다.

3.2 변형량 분포 (displacement distribution analysis)

3.1절과 동일한 가정에서 변형량을 추적하였다. 소재의 변형량을 알아보기 위해서 1MPa에서 5MPa 범위의 유체압력을 블레이드 표면에 가하면서, total displacement field를 추적 계산 하였다. 다양한 압력하에서의 변형량 계산 결과를 Fig. 7에 정리 하였다.

Fig. 7 (Case I)과 같이, 1MPa의 압력에서는 최대 변형량은 $50\mu\text{m}$ 내외로 주로 블레이드 상하부 탭(구속 위치)에서 상대적으로 먼 중앙부위인 것으로 확인 하였다. 이는 압력이 가해질 시에 구속된 블레이드 하부 탭에서 변형량이 누적되어 구속위치에서 가장 먼 곳에 최대 변형이 발생 된 것이다. 압력이 3MPa와 5MPa로 상승시에 최대 변형량은 $140\mu\text{m}$ 과 $250\mu\text{m}$ 내외였으나, 최대 변형위치는 1MPa과 동일 하였다.

동일한 압력조건을 Case II (하부 전영역을 구속)에 적용한 결과를 Fig. 8에 도시 하였다. 결과에서 나타난 바와 같이, 1MPa의 압력에서는 최대 변형량이 $40\mu\text{m}$ 내외, 3MPa에서는 $120\mu\text{m}$ 내외, 그리고 5MPa에서는 $200\mu\text{m}$ 내외로 계산되었다. 이는 Case I(하부 탭 일부 구속)의 경우보다 상대적으로 변형량이 적게 발생된 결과를 보여 주고 있다. 이는 하부의 구속영역이 클에 따라 변형량이 상대적으로 적게 발생된 것으로 판단된다.

동일한 압력조건을 Case III (상부 탭 및 하부 전영역을 구속)에 적용한 결과를 Fig. 9에 도시 하였다. 결과에서 나타난 바와 같이, 1MPa의 압력에서는 최대

Fig. 7 Displacement distribution on the blade (Case I, unit μm)

변형량은 $30\mu\text{m}$ 내외, 3MPa에서는 $90\mu\text{m}$ 내외, 그리고 5MPa에서는 $160\mu\text{m}$ 내외로 Case I과 Case II에 비해서 현저히 변형량이 적었다. 이는 구속된 영역이 많아서 상대적으로 변형량이 적게 발생한 결과를 보여 주고 있다.

4. 결과 분석 및 고찰

접합부분에 따른 최대 변형량을 측정한 결과를 Table 2에 정리 하였다. 정리된 바와 같이, 가해지는 압력이 증가할수록 최대 변형량은 예측된 바와 같이 점진적으로 증가가 하였다. 동일 압력에서는 Case I (블레이드 하부 탭 고정) 보다는 Case III (블레이드 상하부 탭 고정)에서 변형량이 월등히 감소됨을 알 수 있었는데, 이는 외팔보 형태보다는 양단지지 형태로 고정되는 것

Fig. 8 Displacement distribution on the blade (Case II, unit μm)

이 변형량 관점에서는 훨씬 유리함에서 기인한다.

블레이드 접합부분에 따른 최대응력을 측정한 결과에서는 반대의 경향을 보였다. 즉, Case I에서 1MPa를 가할 시 최대응력은 250MPa 내외 였으나, Case II에서 1MPa를 가하였을 시에는 최대응력이 파단강도 이상의 응력분포를 보였다. 특히 최대응력이 분포한 지점은 예측된 바와 같이 구속된 블레이드 상부 탭과 블레이드 하부 탭에서 발생이 되었다. 이는 블레이드에 압력이 가해질 때에 구속되지 않은 블레이드 탭 부위의 변형으로 인해서 응력이 저감 된 것으로 판단된다. 또한, Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 상부 블레이드 탭 주위로 최대응력이 발생되었으며, 이는 하부의 2개의 블레이드 탭보다 상부 1개의 블레이드 탭에 상대적으로 하중이 많이 가해지게 되는 구조와 더불어 코너부의 형상에 응력집중 현상이 발생된 것으로 판단된다.

Fig. 9 Displacement distribution on the blade (Case III, unit μm)

Table 2 Max. displacement

Case study (Applied pressure)		Max. disp. (μm)
Case I	1 MPa	52
	3 MPa	156
	5 MPa	260
Case II	1 MPa	45
	3 MPa	135
	5 MPa	224
Case III	1 MPa	45
	3 MPa	99
	5 MPa	164

5. 결 론

본 논문에서는 고속 회전용 임펠라 블레이드를 레이

저 용접시 발생하는 응력분포 및 변형량 예측에 대한 유한 요소 해석 결과를 분석하였다. 유한요소는 블레이드 하부 탭 고정(Case I), 하부 전 영역 고정(Case II), 상부 및 하부 탭 영역 고정(Case III) 하는 세 가지 경우를 분석 하였다.

각각의 경우별로 변형량을 알아보면, 1MPa의 압력에서는 최대 변형량은 $45\mu\text{m} \sim 52\mu\text{m}$ 내외가 발생 하였고, 압력이 3MPa와 5MPa로 상승시에 최대 변형량은 각각 $99\mu\text{m} \sim 156\mu\text{m}$ 과 $164\mu\text{m} \sim 260\mu\text{m}$ 의 변형량이 발생 하였다.

전반적으로 가해지는 압력이 증가할수록 최대 변형량은 점진적으로 증가 되었으며, 동일 압력에서는 구속부위가 많은 Case III의 변형량이 월등히 감소됨을 알 수 있었다. 반면, 블레이드 접합부분에 따른 최대응력을 측정된 결과에서는 반대의 경향을 보였는데, 구속부위가 많은 Case III에서의 응력이 Case I 보다 월등히 높았다. 이는 블레이드에 압력이 가해질 때에 구속되지 않은 블레이드 탭 부위의 변형으로 인해서 응력이 저감된 것으로 판단된다.

또한, 탭 주위로 최대응력이 발생되었는데, 하부 2개의 블레이드 탭보다 상부 1개의 블레이드 탭에 상대적으로 하중이 많이 가해지게 되는 구조와 더불어 코너부의 형상에 응력집중 현상이 발생된 것으로 판단하였다.

결과적으로 응력과 변형량은 반비례 관계에 있는데, 이를 고려한 용접부 설계가 필요하며, 유한요소법을 사용하여 응력이 집중이 되는 부분의 형상을 최적화 하여 응력과 변형량을 최소화 할 수 있는 블레이드 설계 및 레이저 용접부 설계가 필요할 것으로 판단된다.

유한요소 해석결과의 신뢰성을 검증하기 위해서는 실제 용접품의 실험적 결과와 비교를 하여야 하지만, 밀봉된 용접부 위치의 제한 및 용접부 강도측정의 어려움이 있어서 수행이 되지 못하였다. 향후 이러한 부분이 좀더 보완되면 용접부 설계를 위한 비용절감 및 신뢰도 향상이 이루어 질 것으로 기대가 된다.

ORCID:Chang Min Han: <http://orcid.org/0000-0002-1203-2849>

ORCID:Hae-Woon Choi: <https://orcid.org/0000-0001-8063-7586>

Reference

1. J. Lee, Y. Im and K. Park, Finite Element Analysis of a Customized Eyeglass Frame Fabricated by 3D Printing, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 40(1) (2016) 65-71. DOI:10.3795/KSME-A.2016.40.1.065
2. B. Lee and J. Park, Methodology for Centrifugal Stress Estimation Model Development of Large Steam Turbine Blades, *The KSFM J. Fluid Mach.* 16(6) (2013) 26-31. <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2013.16.6.026>

3. Y. Jang, J. Lee and K. Kang, Structural Integrity of Small Wind Turbine Composite Blade Using Structural Test and Finite Element Analysis, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A.* 36(9) (2012) 1087-1094.
<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.1.085>
4. C. Kim, J. Kim and K. Kim, A Study on the Distortion of a Thin Plate Panel by Laser Welding, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 25(1) (2007) 49-56.
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2009.27.4.054>
5. Material database, AZO materials, www.azom.com