

# Curvic Coupling Tooth 가공의 연삭 조건 선정 및 가공면 평가에 관한 연구

허두권\*, 김명현\*, 김찬규\*, 정영철\*, 정윤교\*, 조영태\*<sup>#</sup>  
\*창원대학교 기계공학부

## A Study on the Selection of Grinding Conditions and Evaluation for Curvic Coupling Tooth Machining

Du-Kwon Hur\*, Myung-Hyun Kim\*, Chan Kyu Kim\*, Young Cheol Jeong\*, Yoon Gyo Jung\*,  
Young Tae Cho\*<sup>#</sup>

\*Department of Mechanical Engineering, Changwon national univ.

(Received 6 February 2018; received in revised form 30 April 2018; accepted 10 May 2018)

### ABSTRACT

As gas turbines for power generation become increasingly more important for high capacity and high efficiency, the technological development and investment of companies are increasing globally. Gas turbine manufacturing technology is only owned by a few companies such as GE, Siemens, and MHI, and our country currently depends on imports of processing technology and component parts. The core part of the gas turbine is curvic coupling tooth processing technology that improves turbine efficiency by smoothly transmitting power to the turbine rotor. Curvic coupling tooth machining and evaluation research is restricted overseas, and it is not underway in Korea. Therefore, in this study, roughing and finishing process technology for curvic coupling tooth machining is developed and a quantitative evaluation method is proposed. For the development of machining technology, the analysis of critical parameters was performed through C & E analysis. In the roughing process, the conditions considering the minimum machining time and tool load ratio were determined. Finishing process conditions were determined based on the contact ratio between the tooth surfaces. The image-processing method is presented for evaluation of the contact ratio and a verification test was performed.

**Key Words** : Curvic Coupling Tooth(커빅 커플링 이), Grinding(연삭), Dressing(드레싱), Contact Ratio(접촉률), C&E Diagram(특성 요인도)

### 1. 서 론

최근 에너지 동향의 관심이 대형터빈 산업으로 집중되고 있으며 이에 따라 가스터빈에 대한 관심 또

한 증가하고 있다. 특히 가스터빈과 관련한 기술 및 부품 등은 많은 투자와 연구가 이루어지고 있으나 대부분 해외 기업에 의존하고 있는 실정이다<sup>[1]</sup>.

Fig. 1과 같이 가스터빈은 크게 컴프레서 로터와 터빈로터로 구성되어 있으며 각각의 로터의 가장자리에는 블레이드가 위치해있다. 블레이드에서 발생하는 회전운동을 다음 로터로 전달하기 위해서는 축이음(Coupling)이 필수적이다<sup>[2-3]</sup>. 커플링은 축과

# Corresponding Author : ytcho@changwon.ac.kr  
Tel: +82-55-213-3608

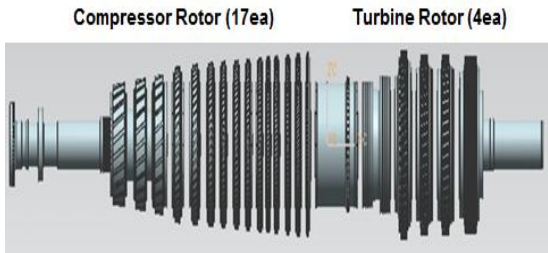


Fig. 1 Schematic diagram of gas turbine

축을 연결하여 동력을 전달하기 위한 목적으로 사용되는 기계요소부품이며 Curvic coupling은 가스터빈에 적용되는 축이음 부품이다<sup>[4-5]</sup>.

가스터빈로터는 원활한 동력 전달을 위해 각 로터에 180개의 이를 가진 Curvic coupling을 사용하고 있다<sup>[6-7]</sup>.

이러한 Curvic coupling 치형은 오목(Concave)과 볼록(Convex) 형상으로 이루어져 접촉면을 크게 함으로써 일반적인 이에 비해 동력 전달의 효율이 매우 향상되어 있다<sup>[8]</sup>.

기존의 Curvic coupling 치형 가공은 체계적인 공정 절차가 확립되어 있지 않으며 현장에서 작업자의 경험에 의존하여 수행되고 있다. 또한 가공 품질 측정에 있어 주요 평가항목인 접촉률(Contact ratio)은 측정규격 및 절차가 없기 때문에 가공 후 주관적인 판단으로 품질 검사가 이루어지고 있는 상황이다. 이러한 이유로 제품 생산의 효율이 낮고 품질의 신뢰성 또한 저하되게 된다.

본 논문에서는 가스터빈로터의 Curvic coupling 치형 가공을 위해 체계적인 연삭 공정조건을 확립하고 이를 바탕으로 가공된 치형의 품질을 정량적으로 판단할 수 있는 새로운 측정 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 실험계획

Curvic coupling 치형가공의 체계적인 실험 계획을 수립하기 위해 먼저 출력변수에 유의한 영향을 미치는 입력변수를 파악하고 그 변수들이 실험결과에 얼마나 영향을 미치는지를 고려하여 Fig. 2와 같은 C&E diagram을 작성하였다<sup>[9-12]</sup>.

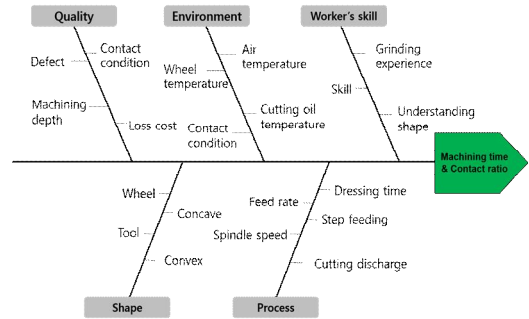


Fig. 2 C&E diagram for curvic coupling tooth

제품의 생산성과 품질을 높이는 것이 목적이므로 Curvic coupling 치형의 가공시간과 접촉률을 목적 함수로 하였으며 영향을 미치는 요인을 품질, 환경, 작업자, 작업방법, 형상으로 분류하였다.

1차 요인 분류를 통해 가공시간과 제품의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 작업방법을 선정하였으며 이 중 Spindle speed, Feed rate, Dressing time, Step feed를 실험의 제어인자로 선정하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

Fig. 3은 스위스의 Maegrle사의 Curvic coupling 치형 전용 가공 장비를 나타낸 것이다. Curvic full depth는 10mm이고 Spindle speed max. 2100rpm으로 구성되어 있으며 Indexing table (mm)은 Max. D2500다.

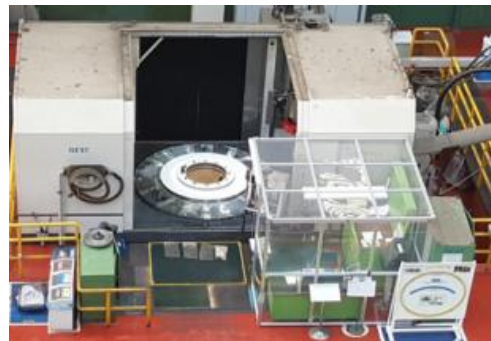


Fig. 3 Special curvic coupling machine

### 3.2 실험시편 및 실험공구

Fig. 4는 실험에 사용된 시편과 연삭숫돌을 나타낸 것이다. 시편은 SM45C이며 사이즈는 외경 1007mm, 내경 957.5mm, 두께 350mm이다.

공구는 Curvic 치형 전용 가공 숫돌인 연삭숫돌 (93S80 H15VP601W)이며 외경 350mm, 내경 290mm, 두께 120mm 인 Convex 형상을 사용하였다. 전용 연삭숫돌은 고순도, 고경도의 알루미늄 입자로 구성되어 있으며 난삭재의 가공에 있어 우수한 연삭성을 가지는 특징이 있다.

### 3.3 실험방법

Fig. 5 는 Curvic coupling 치형의 공정을 나타낸 그림이다. 가공장비는 시편이 고정되는 테이블과 숫돌이 장착되는 스핀들로 구성되어 있다. 이때 숫돌은 고속회전을 하며 Z축 이송을 통해 2개의 치형을 동시에 가공하게 되며 Fig. 6의 결과물을 얻게 된다.



Fig. 4 Specimen and grinding wheel of curvic coupling tooth

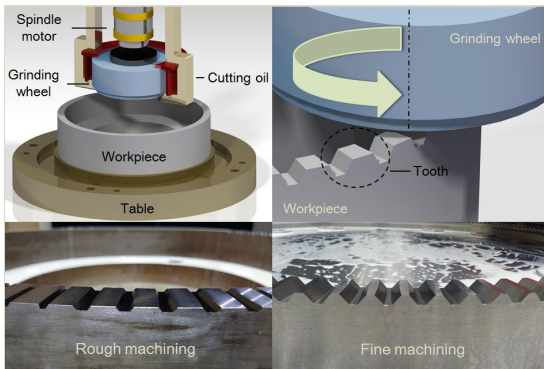


Fig. 5 Processing method of curvic coupling tooth

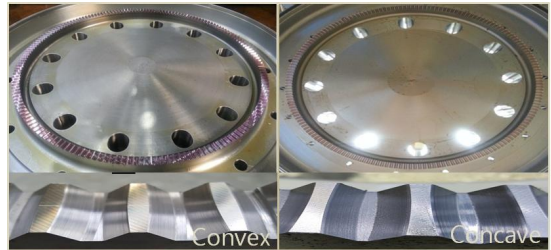


Fig. 6 Two types of curvic coupling tooth with convex and concave shape

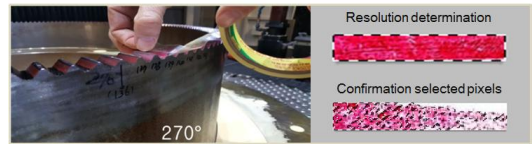


Fig. 7 Image processing for contact ratio

Curvic coupling 치형 가공은 일반적인 연삭과 마찬가지로 황삭과 정삭으로 이루어진다. 황삭의 경우 그라인딩 휠의 압력각이 40°로 날카롭고 치형 형상으로 인해 가공 깊이가 깊어질수록 연삭부하가 증가하므로 파손의 위험이 있다. 제품의 가공시간 및 품질 향상을 위해 그라인딩 휠의 파손이 발생하지 않고 빠른 시간에 가공할 수 있는 공정조건을 확립하는 것이 중요하다. 정삭은 제품의 품질을 결정하며 Curvic coupling 치형 간의 효율적인 동력전달을 위해 표면을 균일하게 가공하여 접촉률을 향상시키는 것이 중요하다. Curvic coupling 치형은 황삭 시 6mm, 정삭 시 0.5mm를 가공하여 총 절삭 깊이가 6.5mm를 만족해야한다.

Spindle speed, Feed rate, Dressing, Step feed 인자에 대해 가공시간과 제품의 품질에 영향을 미치는 인자별 수준을 파악하였고 실험을 통해 네 가지의 인자가 숫돌의 부하에 미치는 공정 조건을 확인하였다.

Fig. 7은 정삭 후 제품의 품질을 측정하는 접촉률 측정방법을 나타낸 것이다. 기존의 접촉률 측정은 Convex 치형에 붉은 시약을 도포하고 Concave 치형에 접촉시킨 후 Concave 치형 표면에 묻은 시약의

양을 육안으로 판단하였는데 본 논문에서는 정량적 판단을 위해서 Concave 치형에 묻은 시약을 테이프 로 채취한 후 이미지를 촬영하고 전체 면적당 시약 이 채취된 면적의 비율을 계산하여 접촉률 데이터를 구하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 황삭가공 결과

Fig. 8은 Feed rate과 Dressing 회수에 따른 Curvic coupling 치형의 가공 시간을 나타낸 그래프이다. Feed rate가 증가하고 Dressing 횟수가 낮을수록 가공시간은 최대 11.5h 감소하는 결과를 보인다. 특히 Dressing 횟수에 비해 Feed rate가 가공시간에 큰 영향을 미친다. 하지만 Feed rate이 높아질수록 숫돌의 부하 또한 증가하므로 제품의 표면에 악영향을 미치고 파손의 위험이 커지게 된다. 따라서 가공시간을 단축시키면서 제품의 품질에 최소한의 영향을 미치는 조건을 파악해야한다. 황삭 가공에서 가공시간의 영향은 Dressing 회수 보다는 Feed rate의 영향이 크다는 결과를 확인하였다.

Fig. 9는 Feed rate 6 mm/min, Dressing 2의 가공조건에서 Spindle speed에 따른 연삭 소요동력을 나타낸 그래프이다. Curvic 치형 가공시 그라인딩 휠의 진동 및 파손이 시작되는 연삭 소요동력은 8kW이다. 연삭 소요동력은 연삭 중에 발생하는 장비의 Power(%)를 정격출력(35kW)에 대한 백분율로 계산하여 나타난 결과를 기준으로 실험에 적용한 것이다.

1500rpm과 1600rpm에서는 연삭 소요동력이 각각 9.05kW와 10.85kW로 그라인딩 휠의 파손이 발생될 수 있는 결과를 얻었고 1400rpm에서는 7.5kW의 연삭 소요동력이 측정되어 안정된 황삭 가공이 이루어졌다. 따라서 가공시간을 최소화하고 그라인딩 휠이 파손되지 않는 최적의 황삭 조건은 Spindle speed 1400rpm, Feed rate 6mm/min, Dressing 2회임을 알 수 있다.

Fig. 10은 Spindle speed 1400rpm, Feed rate 6mm/min, Dressing 2일 때 Step feed 깊이에 따른 연삭 소요동력을 나타낸 것이다. Curvic coupling 치

형의 형상은 가공 깊이가 증가할수록 공구면과 가공물간의 접촉면이 증가하게 되어 과열삭시에 공구에 많은 부하가 걸리게 된다. 그림에서 각각의 포인트는 Step feed 깊이 0.5mm, 1mm, 2mm, 3mm를 나타낸 것이다. Step feed 깊이 2mm와 3mm는 연삭 소요동력이 7.7kW와 7.35kW 로써 다른 두 조건에 비하여 상대적으로 높은 부하를 받는 것을 알 수 있다. 부하가 높은 조건에서는 제품의 품질이 저하되고 공구의 수명을 단축시키게 된다. 반면, Step feed 깊이 0.5mm와 1mm에서는 6.3kW와 5.95kW의 연삭 소요동력이 측정되었으며 상대적으로 파손의 위험이 낮은 조건이다. 두 조건에서 제품의 가공시간 및 가공횟수를 고려하였을때 Step feed 깊이는 1mm가 최적조건임을 확인하였다.

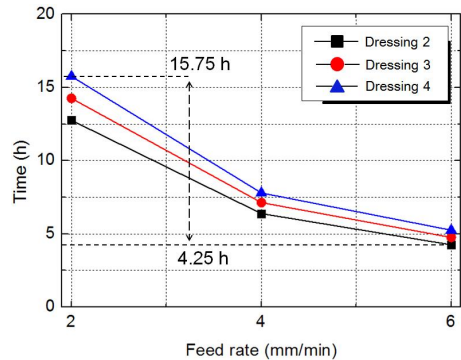


Fig. 8 Machining time according to feed rate and dressing

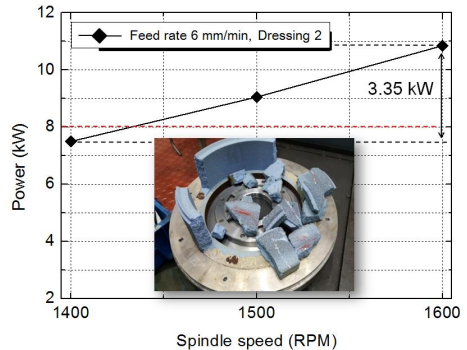


Fig. 9 Machining power according to spindle speed

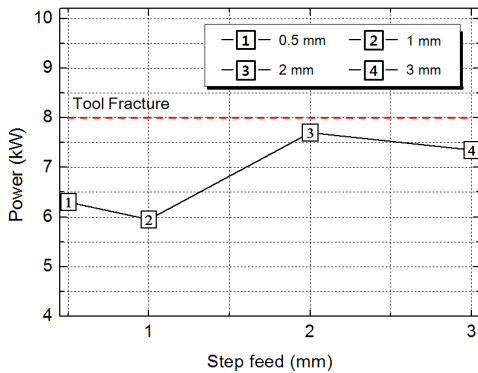


Fig. 10 Machining power according to step feeding depth

## 4.2 정삭가공 결과

Curvic coupling 치형의 접촉률은 정삭 가공 조건 중 Step feed 깊이에 의해 결정된다. 정삭의 Step feed 깊이는 0.005mm, 0.01mm, 0.03mm, 0.05mm의 4수준으로 선정하였고 황삭 실험 조건에서 선정된 Spindle speed 1400rpm, Feed rate 6mm/min과 이를 기준으로 도출된 1400rpm, Feed rate 2mm/min 두 가지의 연삭조건으로 실험을 수행하였다. 정삭가공이 완료된 시편은 치형의 0°, 90°, 180°, 270°의 네 영역에서 시편을 채취한 후 이미지 프로세싱을 통해 접촉률을 정량적으로 측정하였다.

Fig. 11은 절삭 깊이에 따른 정삭조건의 접촉률을 나타낸 그래프이다. I 그룹은 Spindle speed 1400rpm, Feed rate 2mm/min이며 II 그룹은 Spindle speed 1400rpm, Feed rate 6mm/min를 나타낸 것이다. II 그룹에서 절삭 깊이가 0.05mm와 0.03mm인 경우 180개의 치형 중 시약이 묻어나오지 않는 치형이 많이 측정되었다. Step feed 깊이가 0.01mm와 0.005mm인 경우에는 각각 42%, 58%가 측정되었다.

반면 I 그룹의 조건은 II 그룹에 비해 높은 접촉률이 측정되었으며 절삭깊이가 0.05mm, 0.03mm, 0.01mm인 경우에 각각 39%, 46%, 59%의 접촉률이 측정되었고 0.005mm에서 최대 84%의 접촉률이 측정되었다. Curvic coupling 치형 가공의 평가 기준으로 접촉률이 75% 이상이 되어야 성공으로 판단하게 되며 목표 정삭 깊이인 0.5mm 가공까지 소요되

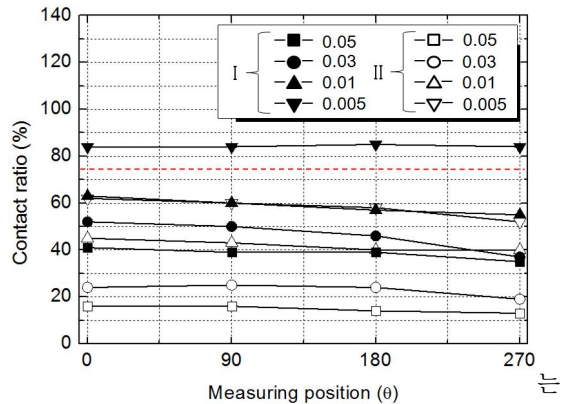


Fig. 11 Contact ratio according to depth of cut

는 가공 횟수 및 시간을 고려하였을 때 Step feed 깊이가 0.005mm가 최소 가공 횟수 및 시간이 소요되는 최소 Step feed 깊이로 판단된다. 이를 바탕으로 최적의 정삭 조건은 Spindle 1400rpm, Feed rate 2mm/min, Step feed 깊이가 0.005mm 라고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구를 통해 대형가스터빈의 기계요소부품 중 Curvic coupling 치형을 제작하는데 있어 연삭 공정의 황삭 및 정삭 가공 조건을 수립할 수 있었다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 황삭가공에서 그라인딩 휠의 파손이 발생하지 않고 가공시간을 최소화하는 조건으로 Spindle speed 1400rpm, Feed rate 6mm/min, Dressing 2회, Step feed 깊이가 1mm의 공정조건을 도출하였으며 최대 11.5h를 단축시킬 수 있었다.

(2) 정삭가공에서 Spindle speed 1400rpm, Feed rate 2mm/min, Step feed 깊이가 0.005mm 조건으로 Curvic coupling 치형의 접촉률을 75% 이상으로 얻을 수 있었다.

(3) 이미지 프로세싱을 도입한 접촉률 측정방법을 제시하여 육안으로 판단하는 정성적 방법에서 정량적인 방법으로 접촉률을 측정할 수 있음을 보였다.

본 연구를 통하여 향후 실제 현장에서 Curvic coupling 치형을 가공하는데 있어 높은 수준의 품질을 유지하면서 가공시간 단축에 따른 생산성 향상이 기대된다.

## 후 기

"본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 Grand CT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음" (IITP-2018-2016-0-00318)

## REFERENCES

1. Pisani, S. R. and Rencis, J. J., "Investigating CURVIC coupling behavior by utilizing two-and-three-dimensional boundary and finite element methods," *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 24, No. 3, pp. 271-275, 2000.
2. Jiang, X., Zhu, Y., Hong, J., Chen, X. and Zhan, Y., "Investigation into the loosening mechanism of bolt in curvic coupling subjected to transverse loading," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 32, pp. 360-373, 2013.
3. Huang, K., Xiong, Y., Wang, T. and Chen, Q., "Research on the dynamic response of high-contact-ratio spur gears influenced by surface roughness under EHL condition," *Applied Surface Science*, Vol. 392, pp. 8-18, 2017.
4. Lee, G. I. and Kim, J. Y., "Evaluation of Reliability of Large Hybrid Curvic Gear Using Thermography," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.16. No.3, pp. 146-152, 2017.
5. Tsai, Y. C. and Hsu, W. Y., "A Study on the CAD/CAM of Curvic Couplings," *ASME Turbo Expo 2002 : Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 3, pp. 1157-1162, 2002.
6. Park, D. K., Lee, C. M. and Kim, J. W., "Development of Manufacturing Process for a Curvic Coupling of Machine Tools and Inspection Device," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25. No. 5, pp. 28-33, 2008.
7. Kim, C. S., Jeong, H. H., Lee, D. H., Lee, D. H. and Choi, H. O., "A study of Structure Analysis modeling of Curvic Coupling by Experiment and Theory," *Proceedings of KSPE 2008 Spring Conference*, pp. 823-824, 2008.
8. Choi, J. H., Kim, C. S. and Cho, S. Y., "A Study on the Relationship between the Cutting Force and the Critical Ejecting Distance of Disk for a Mill Turret," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 12, No. 1, pp. 110-116, 2013.
9. Lee, H. J., Kang, N. S., Jeon, Y. G., Kim, K. H., Kim, H. G. and Kim, J. Y., "A Case Study of Six Sigma Project for Improving Measurement Method of Skin Elasticity," *Korean Journal of Oriental Medicine*, Vol. 16. No.3, pp. 135-140, 2010.
10. Lee, J. H., Song, H. W. and Kim, J. Y., "A Study on Quality Control and Measurement for Acquisition of Dynamic Friction Coefficient on Back-hand Skin," *Korean Journal of Oriental Medicine*, Vol. 14. No. 3, pp. 103-111, 2008.
11. An, I. H., Hur, N. S., Lee, I. B. and Lyu, S. K., "A Study on Effect of the Grinding in SCM420H Planetary Gear," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11. No. 5, pp. 54-59, 2012.
12. Kim, L. S., Kim, J. M., Choi, C., Liang, L. J. and Lyu, S. K., "Study on the Teeth Grinding Condition of SCM415H Gears," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14. No. 2, pp. 19-24, 2015.