

유한요소 해석을 통한 레이디얼 빔 커플링의 설계인자 분석

Design Parametric Analysis of Radial Beam Coupling using Finite Element Analysis

이치범¹, 박영일^{1,✉}
Chibum Lee¹ and Yeong Il Park^{1,✉}

¹ 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National Univ. of Science and Technology)

✉ Corresponding author: yipark@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-948-1651

Manuscript received: 2012.7.13 / Revised: 2013.1.23 / Accepted: 2013.2.26

In this paper, a novel radial beam coupling model was proposed and the design parameters were studied for the efficient transmission of torque. To develop a high performance radial beam coupling, an analytical way to predict the performance in design phase is required. One of the best ways to estimate the performance of the coupling without manufacturing is to evaluate the stress and torsional stiffness by building a finite element model with a special attention to the radial beam cutting part. For the best results of FEA, the material properties were obtained through testing. To verify the reliability of finite element model, the results of FEA were compared with the experiments. The main design parameters of radial beam cutting width, radial beam cutting depth, and radial beam cutting direction were considered for the performance of radial beam coupling.

Key Words: Radial beam coupling (레이디얼 빔 커플링), Moment of inertia (관성모멘트), Torsional stiffness (비틀림 강성), Transmission force (전달력), Bending stiffness (굽힘 강성)

1. 서론

유연 커플링(flexible coupling)은 동력전달과정에 많이 사용되는 부품으로 축의 비틀림 진동을 완화시키고, 열팽창 등에 의한 축 방향의 움직임을 보정하며, 일정 범위 이내의 정렬불량을 수용할 수 있는 필수적인 부품이다.¹ 회전체는 주로 축의 회전력을 다른 형태의 에너지로 변환하는 역할을 담당하기 때문에 커플링의 동력전달성능은 구동 설비의 효율에 큰 영향을 끼친다.² 유연커플링 중에서 보정 축이음 연결방법으로 가장 많이 사용되는 것은 레이디얼 빔 커플링(radial beam coupling)으로 빔 샤프트 커플링(beam shaft coupling)이라고도 불리며 중심부에 가공된 판 스프링 형상이 금속판의

두께와 길이를 따라서 편심, 편각, 엔드 플레이를 적절하게 흡수한다. 레이디얼 빔 커플링은 고강성 알루미늄 합금이나 스테인레스강으로 제작되어 비틀림 강성과 전달토크가 크고 백래쉬가 없으며, 정밀한 동심원 일치도와 낮은 관성을 지니므로, 높은 회전수에서 사용 가능한 장점이 있으므로, 고정밀 위치제어 시스템 및 여러 실험장비 등에 널리 사용된다.³ 스프링의 형상에 따라 크게 헬리컬형(helical type)과 스텝형(step type)으로 나뉘며, 본 연구에서 사용한 스텝형이 Fig. 1에서 나타나있다.

현재 국내에서 제작되고 있는 커플링은 기존의 외국 제품을 모방하여 만든 것이 대부분이며, 제품의 성능 사양이 정확하지 않은 경우가 많다. 또한, 제품의 재질과 가공상의 오차 및 제품 형상에

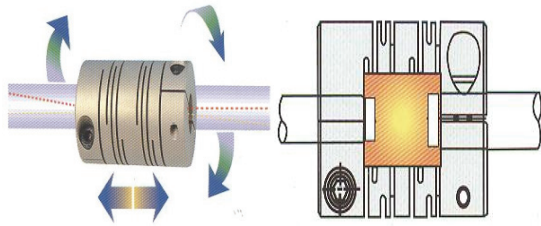


Fig. 1 Radial beam coupling (4 step type)

대한 변형 등에 의한 성능의 편차가 존재한다. 따라서, 고정밀 시스템에서 요구하는 정확한 용도에 일치하는 성능의 커플링을 제공하지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 레이디얼 빔 커플링의 동력전달 성능 해석을 위하여 유한요소 모델을 제시하고, 커플링의 동력 전달 특성의 정형화된 규격을 제시하기 위하여 관련된 설계인자에 대하여 분석하였다. 이를 위하여 커플링 재료의 물성 실험을 통하여 구한 항복강도, 탄성계수 값으로 토크 영역을 설정하였으며, 유한요소 해석결과는 비틀림 실험과 비교 평가하여 모델의 신뢰성을 검증하였다. 또한 설계인자를 선정하고 이의 변화에 따른 해석 결과를 비교 및 평가하여 동력 전달 특성에 있어 효율적인 설계를 위한 참고자료를 제시하였다.

2. 레이디얼 빔 커플링의 동력성능지수

레이디얼 빔 커플링의 동력성능을 평가하는 성능지수로서, 질량관성모멘트, 최대토크 및 허용토크, 비틀림 강성을 선정하였다.

2.1 질량 관성 모멘트

커플링에서의 축방향 관성모멘트는 변형량과 시간 특성 등 정밀한 위치 결정에 영향을 미치며 커플링을 포함한 기계의 관성은 고속 응답 성능을 결정하는 중요한 항목이다. 커플링 자체의 안전성, 강도, 강성을 만족한다는 전제 하에서 커플링의 관성을 줄이는 것은 커플링을 소형화 시키면서 더 큰 토크 전달을 가능하게 하고, 고속 동력 전달 특성을 향상시킨다.

2.2 최대 토크 및 허용토크

커플링의 재료 특성이 탄성한계 범위 내에 있더라도 모터와 같은 구동부에서 발생하는 규칙적으로 토크 변화 또는 기동 토크와 부하 토크간의

차이 등은 반복적인 탄성 변형에 의한 피로파괴를 유발할 수 있다. 일반적으로 커플링에 사용되는 최대토크(T_{max})는 안전율을 고려하여 발생하는 최대 등가응력(von-Mises stress)이 재료의 항복강도(σ_Y)의 절반값이 되는 경우로 결정(i.e. $\sigma_{vmax} = 0.5\sigma_Y$)하고, 허용토크(T_a)는 피로파괴가 발생하지 않도록 최대토크의 절반값(i.e. $T_a < 0.5T_{max}$)으로 사용한다.⁴

2.3 비틀림 강성

커플링의 비틀림 특성은 주어진 토크와 변형각의 관계로서 금속 커플링의 경우 정적 또는 동적 하중에 의한 비틀림 강성의 차이는 그다지 크지 않다. 조립된 상태에서 전달 하중이 탄성 범위 내에서 유지되고 있다고 가정하면, 작용하는 토크와 단위 길이당의 비틀림각은 비례하고, 토크와 비틀림각 선으로 나타나는 기울기를 비틀림 강성값이라고 한다.

3. 레이디얼 빔 커플링의 유한요소 해석과 검증

재료 물성 시험을 통하여 커플링 재료의 탄성계수, 프와송비와 항복강도를 구하고, 레이디얼 빔 커플링의 유한요소 해석을 수행하여 비틀림 실험결과와 비교 검증하였다.

3.1 물성 시험

레이디얼 빔 커플링의 보다 정확한 유한요소 해석을 위하여 본 연구에 사용된 커플링의 재료인 듀랄루민(AL7075-T6)에 대한 재료 물성 시험을 수행하여 탄성계수, 프와송비와 항복 강도를 구하였다. 시험편 제작은 ASTM-E8을 근거로 하였고, 만능 재료시험기(대경테크사 DTU-900MHA)를 사용하여 시험을 실시하였고, 시험결과 구해진 재료의 물성값은 Table 1과 같다.

3.2 유한요소 모델링

레이디얼 빔 커플링의 유한요소 모델을 수립함에 있어, 축을 조여주는 볼트 부분과 레이디얼 빔 스텝부의 형상이 복잡하고, 특히 레이디얼 빔의

Table 1 Materials property of AL 7075-T6

항복강도 (Yield Strength)	580MPa
연신율 (Elongation)	11.3%
탄성계수 (Modulus of Elasticity)	70GPa
프와송비 (Poisson Ration)	0.33

연결 부분은 응력 집중이 발생하는 부분이므로, 요소의 크기를 작게 모델링하였고, 나머지 부분은 해석 시간을 증가시키는 것에 비하여 해석 결과에는 미미한 영향을 지니므로, 모델링에서는 이를 단순화하였다.⁵ 사용된 요소 타입은 솔리드 3D-8Node 요소이며 유한 요소해석은 ANSYS를 이용하였다.

먼저 사용하는 격자(mesh) 밀도에 따른 유한요소 해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 본 연구에서 고려하는 최대 토크인 5.5 Nm가 작용하는 조건에서 격자밀도를 변화시켜가면서 해석의 민감도를 확인하였다. Fig. 2를 살펴보면 요소의 개수가 증가함에 따라 동일한 지점에서 von-Mises stress가 수렴하는 것을 알 수 있다.

안정적인 해석 결과를 가지도록 최종적으로 90,730개 요소를 갖는 유한요소 모델을 사용하였다. 따라서, 요소 개수의 변화에 따른 해석 결과의

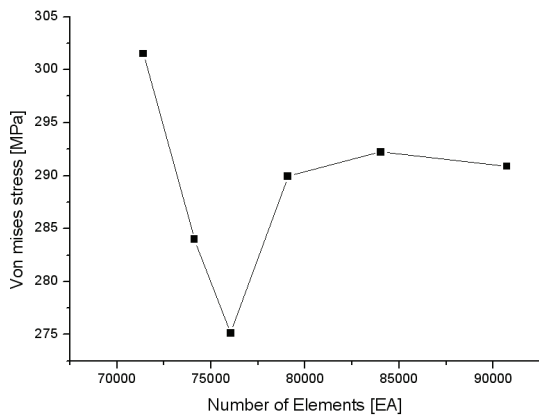


Fig. 2 Sensitive analysis for number of elements

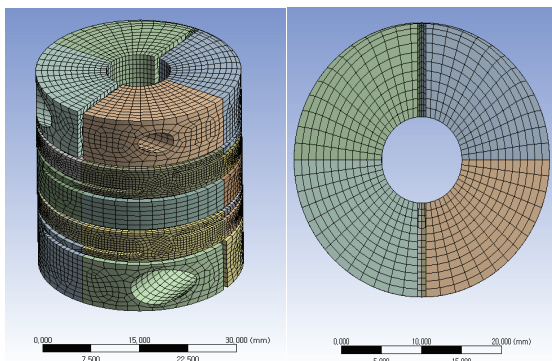


Fig. 3 Finite element model of radial beam coupling (90,730 elements)

불규칙성을 배제할 수 있게 되어 해석의 신뢰성을 확보할 수 있다. 완성된 유한요소 해석 모델의 형상은 Fig. 3과 같다.

3.3 비틀림 실험과 유한요소 해석의 비교

유한요소 해석결과와 유효성을 검증하기 위하여 비틀림 시험기를 사용하여 비틀림 실험을 수행하였다. Fig. 4는 토크미터(Cedar사 DI-5M)를 이용한 비틀림 시험기의 모습이다. 비틀림 시험은 커플링의 양단에 가공된 샤프트를 끼우고, 한 쪽은 지그로 고정시키고 다른 한 쪽은 일정한 속도로 회전시켜 5.5Nm까지 0.5Nm 간격으로 비틀림 각을 측정하였다. 커플링에 대한 규격화된 시험 규정이 없으므로, 총 3개의 시편에 대하여 3회 시험을 실시하였다.

유한요소 해석에서는 재료 물성 시험으로 얻어진 Table 1의 값을 사용하였으며, 커플링의 축 연결부 한쪽을 구속시켜 놓고 반대편 축 연결부 부분에 토크를 주는 조건으로 0.5Nm 부터 0.5Nm 간

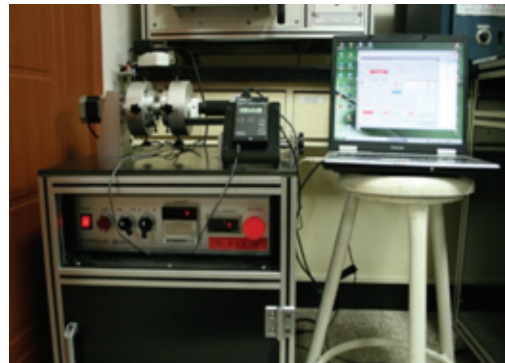


Fig. 4 Instrument for torsion test

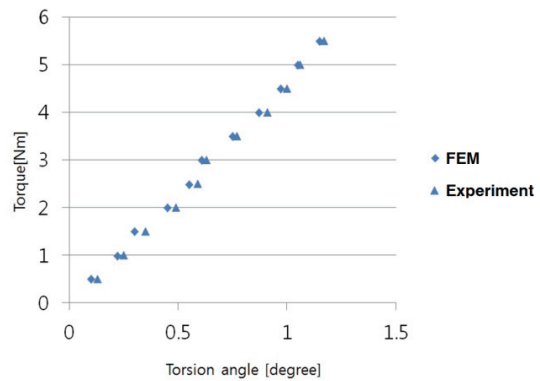


Fig. 5 Torque vs. torsional angle

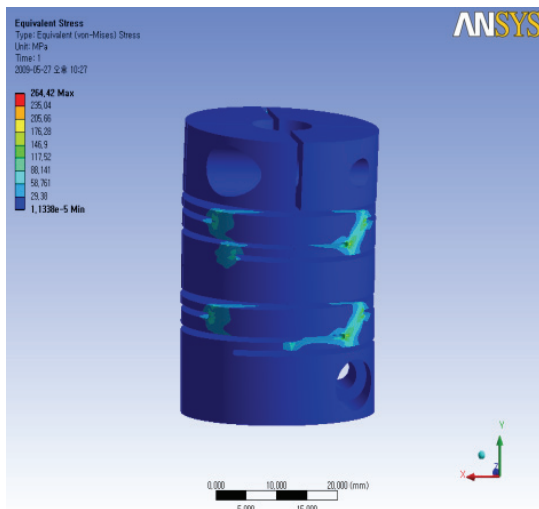


Fig. 6 von-Mises stress under torque 5.5Nm

격으로 순차적으로 최대 토크가 5.5Nm 될 때까지 증가시켰다. Fig. 5는 토크에 따른 비틀림각을 각각 유한요소 해석과 비틀림 실험을 통하여 구하고 이를 비교한 결과이다. 해석 및 실험 결과에서 비틀림각 대 토크의 기울기는 비틀림 강성을 의미하며, 비틀림 강성값은 실험결과와 해석결과가 5% 이내로 일치함을 보이고 있어 유한요소 모델의 적정성을 최종 확인 할 수 있다.

참고로 본 유한요소 모델을 이용하여 최대 토크와 허용 토크를 평가하였다. 레이디얼 빔 커플링의 상용 토크계산을 위하여 반복적으로 유한요소 해석 수행한 결과, 대상 레이디얼 빔 커플링은 토크가 5.5Nm일 때 von-Mises stress값이 290MPa(항복강도의 절반)이 되었다. 따라서, 대상 레이디얼 빔 커플링의 최대 토크는 5.5Nm이고, 상용 허용토크는 이의 절반인 2.75Nm으로 판정되었다.

4. 설계인자에 따른 커플링의 특성 해석

동일한 외형 크기를 지니는 경우에 대해서 레이디얼 빔 커플링의 동력 전달 성능을 향상시키기 위한 설계인자로서 레이디얼 빔의 절삭 두께(Fig. 7), 절삭 깊이(Fig. 8), 절삭 회전방향(Fig. 9)을 고려하였다.

절삭 두께는 와이어 절삭시의 두께이며, 와이어가 두꺼울수록 각 스텝의 스프링 판이 얇아지게 된다. 기본 모델은 레이디얼 빔의 절삭 두께가 0.8mm이다.

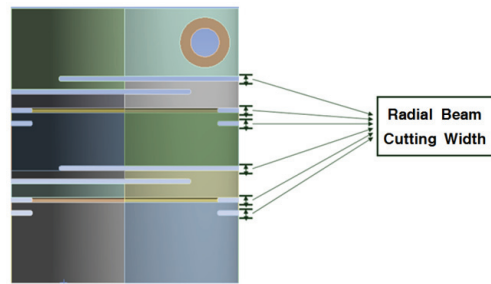


Fig. 7 Radial beam cutting width

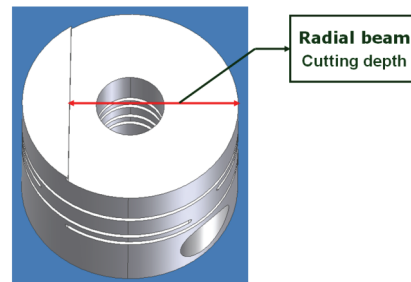


Fig. 8 Radial beam cutting depth

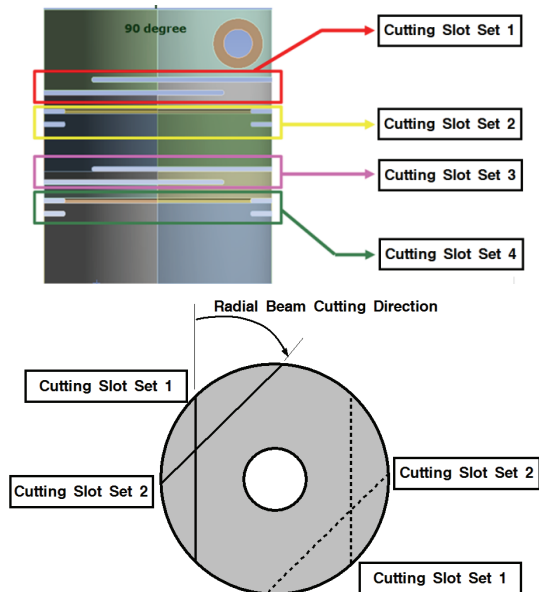


Fig. 9 Radial beam cutting direction

레이디얼 빔의 절삭 깊이는 전체 지름 중에서 와이어로 절삭을 하게 되는 깊이로 이 값이 클수록 레이디얼 빔은 작은 부분으로만 동력을 전달하게 된다. 기본 모델은 직경이 31.8mm이며, 절삭 깊이는 24.8mm이다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 레이디얼 빔의 각 스텝은 서로 반대방향에서 두 번 절삭하여 한 조(set)로 이루어져있다. 현재 기본이 되는 모델은 4개의 스텝으로 이루어져 있으며, 첫번째 스텝을 0°라고 정하면 각 세트별로 절삭 가공하는 회전 각도는 0°- 90°- 0°- 90°로 이루어져있다.

앞서 완성한 유한요소 모델을 이용하여 해당 설계인자를 변화시켜가면서 비틀림 강성과 von-Mises stress의 해석 결과를 분석하였다.

4.1 레이디얼 빔의 절삭 두께 변화

레이디얼 빔 절삭 두께를 0.6mm에서 1.1mm까지 0.1mm 간격으로 변화시키면서 6개의 모델에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다.

Fig. 10은 레이디얼 빔의 절삭 두께 변화에 따른 von-Mises stress값과 비틀림 강성값을 각각 비교한 그래프이다. 레이디얼 빔 절삭 두께가 커질수록, von-Mises stress값이 감소하고, 비틀림 강성값도 비례적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 커플링의 설계시 재료의 항복강도와 해석의 von-Mises stress를 고려하여 토크를 조정함으로써 특성을 조절할 수 있음을 의미한다. 절삭 두께가 증가하면, 동력을 전달하는 스프링 판재의 두께가 얇아지게 되고 이에 따라 전체 커플링에 있어서 비틀림 강성이 감소하게 된다. 반면, 절삭 두께가 감소하는 경우에는 와이어 가공의 반원형 단면의 곡률 반경이 감소하므로 응력집중이 발생하여 국부적인 등가응력이 증가하게 된다.

4.2 레이디얼 빔의 절삭 깊이 변화

레이디얼 빔 절삭 깊이를 24.8mm를 기준으로 23.8mm에서 26.8mm까지 5mm 간격으로 변화시키면서 6개 모델에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 커플링 직경 대비 절삭깊이의 상대적인 크기가 미치는 영향을 분석하기 위하여 커플링 직경

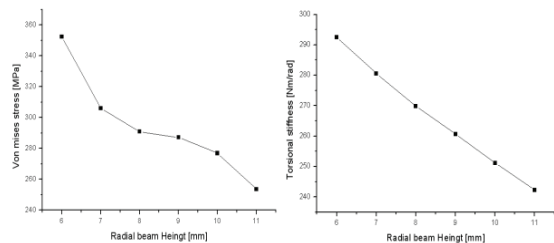


Fig. 10 Von-Mises stress and torsional stiffness w.r.t. radial beam cutting width

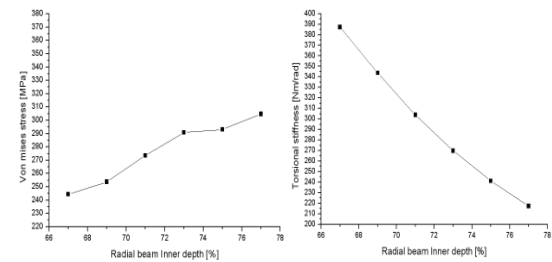


Fig. 11 Von-Mises stress and torsional stiffness w.r.t radial beam cutting depth

인 31.8mm를 백분율 단위 100%로 설정하면 레이디얼 빔 내부 깊이는 각각 23.8mm (74%), 24.3mm (76%), 24.8mm (78%), 25.3mm (80%), 25.8mm (82%), 26.3mm (84%) 에 해당한다.

Fig. 11은 레이디얼 빔 내부 깊이 변화에 따른 von-Mises stress값과 비틀림 강성값을 각각 비교한 결과이다. 레이디얼 빔 절삭 깊이가 커질수록, 작은 면적을 통하여 동력전달이 이루어지므로 von-Mises stress값이 증가하고, 비틀림 강성값은 비례적으로 감소함을 알 수 있다. 반면 절삭 깊이가 작을수록 비틀림 강성이 증가하고, 허용토크를 증가시킬 수 있다. 이는 커플링의 설계시 재료의 항복강도와 해석을 통해 얻은 von-Mises stress를 고려하여 강성을 조절함으로써 동력 전달 특성을 변화시킬 수 있음을 의미한다.

4.3 레이디얼 빔의 절삭 회전방향 변화

기존의 레이디얼 빔 커플링의 구조는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 각 스텝의 절삭 가공 각도가 0°- 90°- 0°- 90°로 이루어져있다. 절삭 회전 방향의 변화에 따른 특성 변화를 살펴보기 위하여 1,3번 스텝의 절삭 회전 각도는 그대로 유지한 채 2,4번 스텝의 절삭 회전 각도를 45°(즉, 0°- 45°- 0°- 45°), 135°(즉, 0°- 135°- 0°- 135°), 180°(즉, 0°- 180°- 0°-180°) 방향으로 변화를 주어 기준 모델인 90°모델과 함께 총 4개의 모델에 대해 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 12의 해석 결과에 따르면 방향이 90°일 때의 기본 해석 모델 기점으로 von-Mises stress값이 최대이고, 45° 및 135°일 때 감소한다. 또한 비틀림 강성값은 90°일 때의 기본 해석모델까지 감소하다가 90°를 기점으로 다시 증가한다. 즉, 기본 모델 90°일 때가 von-Mises stress가 가장 크게 나타나고 비틀림 강성은 가장 작게 나타나므로, 가장 불리한 경우이다.

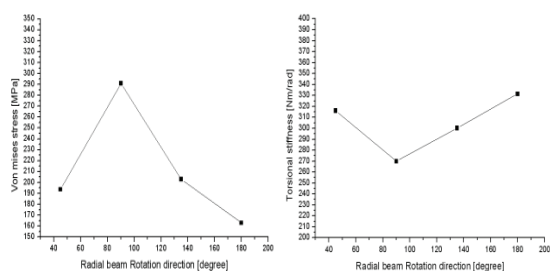


Fig. 12 Von-Mises stress and torsional stiffness w.r.t radial beam cutting direction

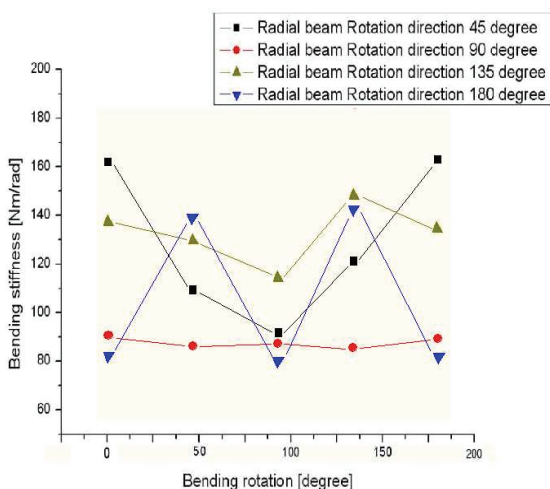


Fig. 13 Bending stiffness with cutting of direction

비틀림 강성과 응력의 관점에서 가장 불리함에도 대부분의 스텝형 유연 커플링이 절삭 회전방향을 기본 90°로 채택하는 이유는 대칭성에 있다. 레이디얼 빔의 절삭 회전방향의 변화는 커플링 굽힘 방향의 강성도 변화시키게 된다. 이를 확인하기 위하여 굽힘방향의 강성 특성에 대한 해석을 실시하였고, 해석조건은 레이디얼 빔 커플링을 0°, 90°, 180°, 270° 회전시키면서 굽힘방향의 힘을 주면서 굽힘 강성을 해석하였다.⁷ Fig. 13은 레이디얼 빔의 회전방향 변화에 대한 굽힘강성 결과이다. 기존 모델(90°)은 비틀림 강성값이 다소 낮지만, 굽힘강성이 회전 방향에 대하여 비교적 일정한 강성을 나타낸다. 이는 커플링의 회전에 따른 동력전달의 균질성을 유지할 수 있게 해준다. 따라서, 레이디얼 빔 절삭 회전방향은 축방향 동력전달의 대칭성에 영향을 미치므로, 비틀림 강성뿐만 아니라 굽힘 방향의 강성도 고려해야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 레이디얼 빔 커플링의 동력전달 성능을 분석하기 위하여 유한 요소 해석을 이용하였다. 유한요소 모델의 신뢰성 확보를 위하여 재료 물성시험을 실시하여 유한요소 해석의 입력자료로 사용하였고, 격자밀도 변화에 따른 민감도 해석을 통하여 오차를 5% 이내의 안정적인 해석결과를 얻었다. 유한요소 해석 결과의 검증 위하여 비틀림 실험을 실시하여 동일 조건에서의 유한요소 해석과 비교하였으며 두 결과가 5% 이내로 일치하였다. 신뢰성이 확보된 레이디얼 빔 커플링의 유한요소 모델을 이용하여 설계인자에 따른 커플링의 특성 해석을 수행하였다. 이를 통하여 레이디얼 빔 커플링의 개발을 위한 참고자료로 사용이 가능하며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 레이디얼 빔의 절삭 두께를 증가시킬수록 von-Mises stress과 비틀림 강성이 감소하였다.
- 2) 레이디얼 빔의 절삭 깊이를 증가시킬수록 von-Mises stress는 증가하였고 비틀림 강성은 감소하였다.
- 3) 레이디얼 빔의 절삭 회전방향은 90°일 때 von-Mises stress가 가장 크고 비틀림 강성이 작지만 굽힘 방향의 해석에 의하면 90°일 때 회전방향 변화에 따른 굽힘 강성이 가장 균일하여 동력전달의 균질성을 유지하기 위한 가장 바람직한 각도로 평가할 수 있다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구 지원비로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, S. K., Lee, S. J., and Lee, J. M., "Dynamic Analysis of Spindle System with Magnetic Coupling(I)," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 11, No. 4, pp. 99-105 1994.
2. Kim, B. O., and Kim, Y. C., "A Study on Development the Dynamic Model to Misaligned Gear Coupling (I)," Trans. of the KSME (A), Vol. 27, No. 6, pp. 857-863, 2003

3. Tadeo, A. T. and Cavalca, K. L., "A Comparison of Flexible Coupling Models for Updating in Rotating Machinery Response," *Journal of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, Vol. 25, No. 3, 2003.
4. Budynas, R. G. and Nisbett, J. K., "Shigley's Mechanical Engineering Design," 9th ed., McGraw Hill, p. 282, 2011.
5. Hwang, H. S., Yang, B. S., and Kim, W. C., "Vibration Analysis of Rotor-System with Coupling Misalignment by Finite Dynamic Element Method," *Proceedings of the KSME 2012 Fall Annual Meeting (A)*, Vol. 2, No. 1, pp. 650-655, 1996.
6. Sekhar, A. S. and Rao, A. S., "Vibration analysis of Rotor-Coupling-Bearing System with Misaligned Shafts," *International Gas Turbine and Aeroengine Congress & Exhibition*, 1996.
7. Tadeo, A. T. and Cavalca, K. L., "Modeling effect of flexible and rigid couplings in mechanical systems," *IFTOMM 2002- 6th International Conference on Rotordynamics*, Vol. 1, Sydney - Australia, 2002.