

◆특집◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 I

공작기계용 Curvic Coupling 생산공정 및 검사용 치구 개발

박동근*, 이춘만**, 김재웅***

Development of Manufacturing Process for a Curvic Coupling of Machine Tools and Inspection Device

Dong Keun Park*, Choon Man Lee** and Jae Woong Kim***

Key Words : Curvic coupling (커빅 커플링), Heat treatment (열처리), Grinding cutting (연삭), Development of process (공정개발), Surface roughness (표면거칠기), Inspection device (검사장치)

1. 서론

공작기계 주요요소 중의 하나인 인덱스테이블은 머시닝센터를 예로 든다면 B축을 구성하여 가공물을 미세회전 시키면서 일정원주를 분할하여^{1,2} 다각형 및 각종 치형을 가공하는데 있어서 매우 중요한 위치를 차지한다.

이러한 인덱스 테이블에는 대부분 커플링(coupling)이 들어가는데 이러한 커플링은 접촉되는 형상에 따라 치의 형상이 사각, 삼각, 크라운 등 용도에 따라 달리 적용된다. 본 연구에서는 항공기 터빈 날개 연결용, 공작기계 회전테이블 연결용, 커빅 커플링(curvic coupling) 개발에 관한 것으로 Fig. 1에서 보는 바와 같이 2개의 링이 한 조가 되어 회전과 접촉을 반복하며 회전력을 전달하는 분할(indexing)의 핵심기능을 하고 있는 장치다. 국내에서는 회전전달용 또는 인덱스 테이블용으로 대부분 사각 또는 삼각형 치차를 적용하고 있고 초정밀 항공기 터빈 압축기용 또는 인덱스 테이블에 들어가는 커빅 커플링은 수입하여 사용해 왔다. 본 연구

는 커플링 중 제작이 어렵고 정밀하다는 커빅 커플링에 관한 것으로 시작은 미국 GLEASON 사가 최초로 개발하여 세계적으로 보급하였으며, 그 후 변형된 방법으로 일본의 OKUBO치차공업(주)가 외경 $\phi 30 \sim \phi 1600$ mm 크기까지 다양화하여 생산하고 있다. 이러한 커빅 커플링은 GLEASON 사의 치면가공기에 의해 가공하려면 오목용과 볼록용으로 각각 약 17억원씩 34억원의 전용 설비를 사용하고 있으며, 3년마다 정도를 위한 교정수리비가 최소 3억원 정도가 소요되고 있다. 이러한 이유로 국내 중소기업이 커빅 커플링을 생산하기 위한 설비를 투자하기에는 매우 힘든 상황으로 국내개발보다 개발제품을 수입하는 쪽을 선호하고 있는 실정이다.

따라서, 이번 연구에서는 값싼 국내 머시닝센터

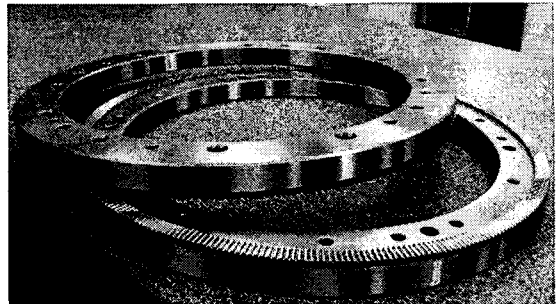


Fig. 1 A Curvic coupling set

* 창원대학교 클러스터사업단

** 창원대학교 기계설계공학과

Tel. 055-213-3622, Fax. 055-263-5221

Email cmlee@changwon.ac.kr

*** 대광평(주)

(약 2억원)를 이용해 가격, 품질, 납기 면에서 미국 GLEASON사나 일본 OKUBO치차공업(주)에서 생산되는 커빅 커플링과 동등 또는 그 이상의 생산성을 가진 커빅 커플링을 개발하는데 목적을 두었으며, 본 제품이 개발되면, 국내 공작기계 업체에 보급은 물론 수입역조 개선에 기여될 것으로 기대된다.

2. 목표설정

커빅 커플링은 그 종류가 다양하여 모든 치수를 다 만들어 볼 수 없으므로 본 개발에서는 공작기계 중 머시닝센터 B축에 자주 사용되는 인덱스 테이블용 커빅 커플링으로 외경 $\phi 420 \times$ 내경 $\phi 320 \times \phi 30.75$ [mm]의 오목과 볼록치차 세트를 개발하는 것으로 계획하였다.

Table 1 Objective specification of developed curvic coupling development

항목	목표규격	비고	
크기	외경420×내경320 ×두께30.75[mm]	오목, 볼록 각 1set	
치수	360개	육안확인	
분해정도	±5.0° 이내	-	
복원정도	±1.0° 이내	-	
치접촉율	50% 이상	광면단 적용확인	
흔들림	상면	0.02 μ m 이내	평가 치구 개발
	외주	0.02 μ m 이내	평가 치구 개발

2.1 치형 설계

커빅 커플링을 최초 개발한 미국 GLEASON 사의 커빅 커플링 설계 이론에서는 Fig. 2와 같이 절삭휠이 소재의 중심을 지나야 되기 때문에 절삭휠의 직경이 매우 크고 절삭휠을 회전시키는 토크가 매우 크기 때문에 가공설비 또한 매우 커야 한다.³

또한 커빅 커플링의 볼록치차와 오목치차를 연삭가공하기 위한 연삭휠과 커플링과 중심선에서의 접촉각 β 에 관한 관계식을 나타내면 식 (1), (2)와 같다.

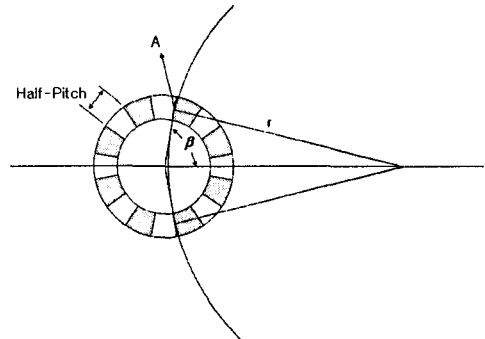


Fig. 2 Diagram illustrating the basic geometry of the curvic coupling

$$\beta = \frac{90 \times n_x}{N} \quad (1)$$

$$r = A \tan \beta \quad (2)$$

위 식에서

n_x : 절삭휠의 맞물리는 두 치차의 반피치수

N : 커빅 커플링 치수

r : 절삭휠의 반경

A : 커빅 커플링의 순수반경

커플링의 직경을 구하는 식은 식 (3)으로 나타낼 수 있다.⁴

$$D = \sqrt[3]{\frac{T}{1310}} \quad (3)$$

D : 커플링 직경(in)

T : 토크(lb-in)

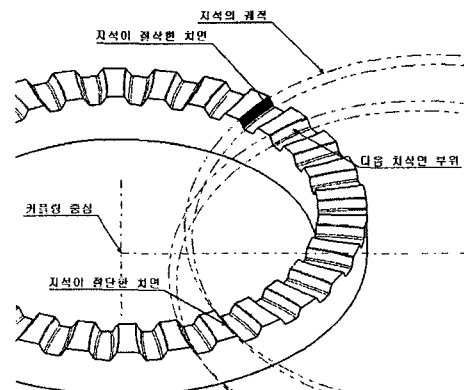


Fig. 3 Cross-section view taken perpendicular to axis of a concave or convex curvic coupling

반면 본 연구에서는 Fig. 3처럼 오목치형을 볼록치형보다 약간 크게하고 볼록치형의 양끝이 오목치형 양끝에 간섭이 되지 않게 어느 한 개의 편 치면과 원주의 대칭쪽에 어느 치와 동시에 서로 물리는 형태로 절삭가공해 나가는 방법을 취하기 때문에 절삭휠이 가공물의 중심선을 지나지 않아 절삭휠은 매우 작아도 되므로 큰 동력의 설비가 필요 없다.

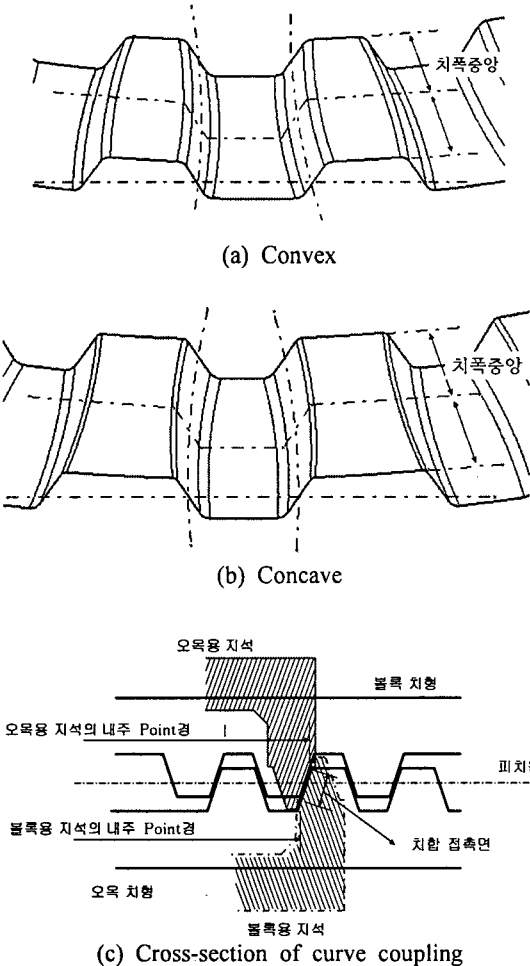


Fig. 4 Cross-section(c) of convex(a) or concave(b) curv coupling

그리고 Fig. 4처럼 치면경사각은 표준이 $30^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 가 있는데 본 개발에서는 25° 를 택하여 치면 자동조짐 안착이 빠르도록 하였고 연삭휠의 다이아몬드 입도는 #120~150 사이를 선정하였다. 또한 Fig. 4와 같이 연삭휠이 볼록치를 가공할 때는 연삭

휠의 안쪽면으로 가공하고 오목치를 가공할 때는 바깥면으로 가공하는데 바깥면이 약간 직경이 크기 때문에 볼록치면보다 약간 큰 크라운(crown) 곡선을 얻으므로 오목치와 볼록치의 끝면이 간섭이 발생되지 않는다. 그러나 치면 접촉율이 80% 이상이 되기 위한 최적곡선을 찾아 가공해야 하고 만약 가공 도중 마스터(master) 치면과 접촉시켜 접촉상태가 불량하면 좌표를 재조정하여 가공해야 한다.

2.2 소재선정

우선 커빅 커플링에 사용될 재질은 미국 GLEASON사와 일본 OKUBO치차공업(주)에서 도입된 커빅 커플링을 입수하여 Fig. 5와 같이 시편을 절단 몰드하여 전자주사현미경으로 분석한 결과 기계적, 화학적 성분이 동등한 국내 개발품 소재용으로 SCM415H를 선정하였다. Table 2는 주사현미경과 인장시험기에 인장시험한 시편의 화학성분과 기계적성분 결과이다.⁵



Fig. 5 Test piece for measurement

Table 2 Test piece for measurement
(a) Chemical component

강종	Chemical Component						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM415	0.13~0.18	0.15~0.35	0.6~0.85	0.03 이하	0.6~0.85	0.03 이하	0.15~0.3

(b) Mechanical component

강종	Mechanical Component			
	인장강도 N/mm ²	신장 %	단면수축률 %	충격치 kgfm/cm ²
SCM415	85이상	16이상	40이상	7이상

2.3 치형의 강도설계

커빅 커플링 강도설계에서는 빈번한 블록치와 오목치의 착탈과 충분한 회전력을 전달해야 하는데 그러기 위해서는 이(tooth)의 전단응력, 전면압축응력, 등가치면 압축응력을 검토하게 되는데 그 식은 (4), (5), (6)과 같다.

$$S_s = \frac{4T}{\pi(D_1 - F_1)^2 \cdot F} \quad (4)$$

$$S_s = \frac{2T}{(D_1 - F) \cdot F \cdot Z \cdot h_0} \quad (5)$$

$$S_{\alpha} = \frac{1}{Z \cdot F \cdot h_0} \left(\frac{F_c}{2 \tan \alpha} + \frac{2T}{D_1 - F} \right) \quad (6)$$

S_s : 치의 전단응력 MPa(침탄의 경우 167MPa이하)

S_c : 치의 압축응력 MPa(침탄의 경우 225MPa이하)

S_{α} : 치의 전단응력 MPa(침탄의 경우 833MPa이하)

T : 토크[N·m]

Z : 잇수

D_1 : 커플링치의 외경[mm]

F : 커플링치 폭[mm]

h_0 : 유효높이[mm]

α : 압력각(25~30°)

F_c : 커플링 체결 하중[N]

3. 공정개발 및 제작

제품 개발에 있어서 중요한 내용 중 하나가 공정에 대한 이해이다. 개발될 제품에 대한 단계별 공정 순서를 정한다는 것은 제작 순서를 결정해 감으로서 혹시 공정 순서가 바뀌어 재제작해야 하는 손실을 방지하거나 공정을 누락하여 실패하는 일이 없도록 하기 위해 사전에 충분히 검토되어야 한다. 본 공정절차 Fig. 6에서는 일본 OKUBO치차공업(주)의 자료를 입수, 분석한 결과 국내 실정에 맞도록 재구성한 절차내용이다.

커빅 커플링 제작은 계획된 공정대로 SCM415H를 선정하여 소재내부의 기공이나 편석, 재료의 이방성을 줄이기 위해 단조제품을 사용하였다. 여기서 주의할 것은 국내에서는 보충된 $\phi 500\text{mm}$ 이상 SCM415H 소재는 생산되지 않으므로 수입을 검토해야 한다. 또한 링 단조 시 소량 다품종일 경우 소재가격이 매우 높으므로 다각적으로 검토되어야 한다. 다음으로 선반에서 황삭을 해야 하는데 실제

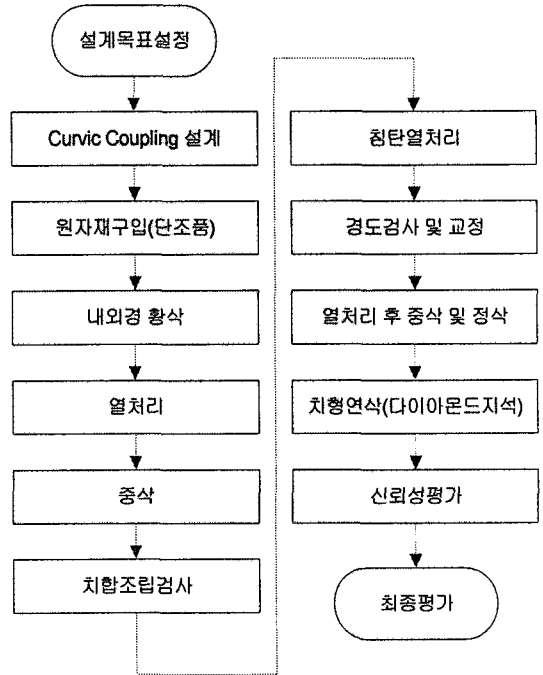


Fig. 6 Flow-chart of the manufacturing process

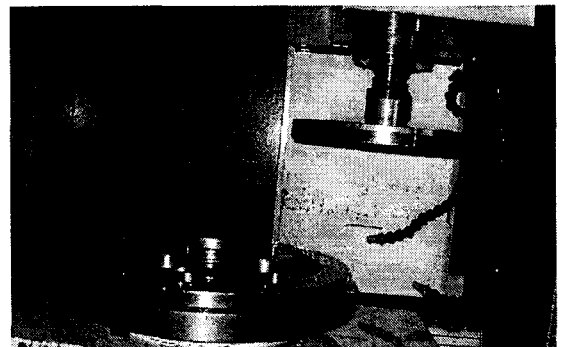


Fig. 7 Machining center for grinding of curvic coupling

황삭가공을 해보면 소재의 경취한 관계와 표면거칠기에 따라 가공이 잘 되지 않고 가공팁의 손상이 자주 발생하는 현상이 보여 황삭 전 핸드 그라인더(hand grinder)로 충분히 스케일이나 버어(burr)를 제거한 다음 선반 가공하였다. 또한 선반가공시 향후 열처리, 변형을 감안하여 1mm이상의 여유공차를 두는 것이 안전하다고 판단해 약 1mm정도 여유를 두고 중삭을 하였다. 다음 공정으로 소재를 열처리 해야 하는데 일반 열처리시 평면으로 놓여놓을 시 변형이 너무 많아 교정이 힘들어서 세워서 열처리

하니 변형량이 매우 적어 다음 가공에 불편이 없었으나 $\phi 400\text{mm}$ 이상의 경우 변형이 일어나지 않게 하기 위해 가열 후 냉각시 프레스로 누른 상태로 물로 냉각하여 변형을 최소화 하는 방법을 사용하였다. Fig. 7은 국내 W사의 KV50에 연삭휠을 장착하여 가공하는 장면을 나타내었다.

4. 제품 검사

본 연구에서 제작된 커빅 커플링은 Fig. 8에 보이는 바와 같이 외경 $\phi 420 \times$ 내경 $\phi 320 \times$ 두께 $30.75[\text{mm}]$ 의 오목치형과 볼록치형 세트이다.

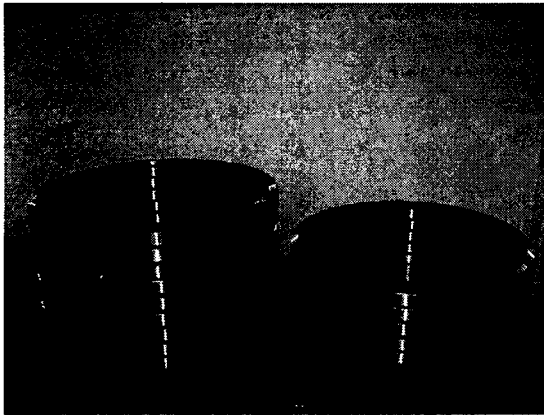


Fig. 8 Machined curvic couplings

본 제품의 품질을 검사하기 위해 우선 육안검사할 수 있는 치형수, 접촉률을 제외하고 흔들림 정도 커플링 상면 평형도, 커플링 내경 동심도, 회전 중심 동심도 등을 검사하기 위해 별도의 검사전용 치구가 필요한데 마스터 커플링을 가공된 커빅 커플링을 가볍게 치합해 볼 수 있도록 회전검사치구를 제작하여 상면 플랜지(Flange)에 올려 놓고 회전시키면서 다이얼게이지를 마그네트 스탠드에 조립시켜 다이얼 게이지로 흔들림을 체크하였다. 검사치구의 플랜지 크기는 직경 $\phi 550$ 으로 하였고 상면의 평행도가 0.003mm 내로 가공조립되었다. 또한 상면 회전을 위해 저어널(journal) 부의 상하 베어링은 #32038 테이퍼 베어링(taper bearing)을 사용하였다. Fig. 9는 제작된 검사치구의 전체도를 나타낸다.

제작된 커빅 커플링을 Fig. 9의 제작된 검사용 전용치구에 올려놓고 검사한 결과는 Table 3과 같다.

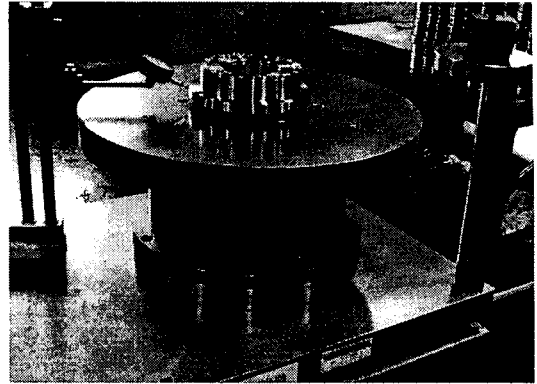


Fig. 9 Picture of special inspection device

Table 3 Result of the curvic coupling

구 분	목표	측정회수	측정치 (평균)	
치접촉	50%이상	50개	80%이상	
흔들림	상면	0.02mm	21	0.02mm
	외주	0.02mm	21	0.01mm
분할정도(누적)	5" 이내	14	5"	
복원정도	$\pm 1.0''$ 이내	14	± 1.0	

5. 결론

본 연구에 있어 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 커빅 커플링의 국내구입 가능한 최적소재는 SCM415H이다.

2. 큰 토크를 전달하지 않고 정밀한 착탈과 흔들림을 최소화하기 위해서는 커빅 커플링의 치면 압력각이 $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 가 있는데 25° 가 자동조립의 안착 상태가 빠르고 양호하였다.

3. 선삭 가공 후 시편의 열처리시 가열 후 프레스로 누르고 수냉각처리를 하면 변형을 줄일 수 있었다.

4. 연삭휠로 치면 연마가공시 마스터 치구를 만들어 한번씩 확인 후 치면 접촉률이 50%보다 낮을 경우 연삭휠의 중심좌표 조정을 가공하므로 접촉률을 높일 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, J. W., Lee, G. W. and Han, J. H., "Development of CNC Rotary Index Table," KSME, Vol. 31, No. 1, pp. 10-25, 1991.
2. Pisani, S. R. and Rencis, J. J., "Investigating Curvic Coupling behavior by utilizing two-and three dimension boundary and finite element methods," Engineering Analysis with boundary elements, Vol. 24, Issue 3, pp. 271-275, 2000.
3. Gleason works Co., "Curvic Coupling Design," Gleason works Co., pp. 1-23, 1973.
4. Gleason works Co., "HOW TO INSPECT FIXED CURVIC COUPLING," Gleason works Co., pp. 1-7, 1973.
5. Hugio, O. and Datsuo, O., "Standard Handbook for Machine Design," Dae Kwang Publishing Co., pp. 3-17, 1999.