

자동차용 대형 휠 디스크의 스피이닝 설계

이 항 수¹⁾

The process planning of disc spinning for a large wheel of automobile

Hang Soo Lee¹⁾

Abstract

Spinning is one of the incremental forming process by the rotating mandrel and forming roller, and has been applied to manufacturing the wheel disc of automobile to simplify the manufacturing process and to improve the mechanical properties of product. In the present study the process variables have been extracted and considered to decide the specification of the spinning machine. The maximum values of working load and power have been evaluated and the blank size has been designed. The shape and dimension of forming roller have been designed and the process condition such as rotational velocity of mandrel and the feedrate of roller have been decided.

Key Words : Spinning, Wheel disc, Feedrate of roller, Rotational velocity of main spindle, Working load, Working power

1. 개 요

1.1 스피이닝이란

금속 판재의 성형가공 중에서 펀치 및 다이 등을 이용하지 않고 회전하는 성형형(맨드렐)에 소재를 고정시킨 후 회전시키는 가운데, 성형롤러나 주걱으로 소재를 점진적으로 맨드렐에 밀어 붙여 맨드렐과 같은 형상의 제품으로 성형하는 가공법을 스피이닝이라 한다. 스피이닝 가공방법은 매우 오래 전에 개발된 방법으로 주로 원추형이나 반구형 등과 같이 축대칭 용기형상의 제품에 대하여 다품종 소량생산에 응용되어 왔으며, 덮드로잉이나 기타의 프레스 성형법으로 가공이 곤란한 난가공 형상의 제품생산에 이용되어 왔다.

이와 같은 스피이닝 공정은 성형기구에 따라 교축스피이닝, 전단스피이닝, 튜브스피이닝 등 크게 3가지로 분류된다. 교축스피이닝(Conventional Spinning; Normal Spinning)이란 판재의 두께를 변화시키기 보다는 소재판을 교축시켜 원형단면의 제품을 제작하는 방법으로

1) 한라대학교 기계공학부

롤의 이동방법에 따라 1-패스 또는 multi-pass 스피이닝으로 적용된다. 전단스피이닝(Shear Spinning)은 축대칭 단면을 가진 맨드릴에 소재를 고정하여 회전시키면서 롤러로 밀어 국부적인 전단변형을 연속적으로 발생시켜 축대칭 셀 제품을 만드는 방법으로 순수 전단변형의 경우에는 전단각도에 따라 두께가 변하게 되며 소재의 외곽직경의 변화는 없다. 튜브스피이닝(Tube Spinning)은 관재(tube)를 회전시키면서 롤을 밀어 두께를 줄이고 얇고 긴 관재를 만드는 방법이다.

이 외에도 Necking, Bulging, Trimming, Curling, Burring 등 많은 스피이닝 공정이 있다.

1.2 연구의 목적 및 연구내용

본 연구에서 개발하고자 하는 자동차용 휠디스크의 가공공정에 대하여 살펴보면 대개 프레스가공법과 스피이닝 공정이 같이 사용되고 있다. 프레스가공법에 있어 각 단면부의 두께를 조절하지 않는 경우에는 블랭킹 된 소재를 냉간에서 프레스성형을 적용하고 있으며 주로 소형차에 이용된다. 대형 트럭이나 버스 등과 같이 크기가 큰 경우에는 단면부의 두께가 위치마다 다소 다르게 제품을 설계하는데, 이때에는 ①가열 - ②테이퍼롤에 의한 열간압연(판두께 변화시킴) - ③트리밍 - ④산세처리 - ⑤프레스성형 등의 순서로 제조공정을 이루고 있다. 따라서 제조공정이 복잡하며 제조비용 또한 상당히 높은 편이다.

이러한 대형 디스크 제품에 대하여 스피이닝 공정을 적용할 경우에는 블랭킹된 원형 소재로부터 복합스피이닝 공정을 응용하여 냉간에서 직접 1-Pass 스피이닝으로 성형공정이 완성될 수 있어 유리한 기술적 특성을 갖는다. 여기서 복합스피이닝이란 교축스피이닝과 전단스피이닝이 조합된 형태의 성형공정을 말하며 외국에서는 통상 1시간당 약 100개 정도(cycle time:35sec)를 생산하고 있다. 스피이닝을 적용할 경우, 재료의 흐름방향으로 결정립이 배열되어 피로수명이 개선되는 제품 특징을 갖고 있으며 항복점, 인장강도, 경도 등 기계적 성질이 개선되는 장점이 있다.

실제로 제품생산을 위한 스피이닝 머시인을 제작하거나 또는 스피이닝 공정을 적용시켜 제품을 생산하기 위해서는 소성가공의 특성 즉, 변형역학적 기술검토가 선행되어야 한다. 기계를 제작할 때에는 기계의 기본 구조나 주요사양에 대하여 역학적 검토가 필요하며 제품생산에 대해서는 공구(롤러)의 케적이거나 가공속도 등 공정변수에 대하여 검토하여야 한다.

본 연구에서는 대형 휠디스크 제조를 위한 스피이닝 머시인을 개발함에 있어 소성가공의 관점에서 검토되어야 하는 사항 즉, 스피이닝의 기초해석을 통하여 기계의 필요한 사양을 선정하며 공정상의 각종 변수들을 추출하고 합리적인 성형공정이 이루어지도록 하는데 목적이 있다.

이러한 목적을 이루기 위해 본 연구에서는 휠디스크에 대한 스피이닝 특성을 검토하며 기계 사양의 결정 및 가공력을 산정하고자 한다.

우선은 스피이닝 공정의 분류에 따른 디스크 제품에 대하여 공정특성을 파악한다. 제품의 단면의 각도 및 두께가 일정하지 않으므로 교축스피이닝과 전단스피이닝이 복합적으로 조합된 만큼 각각의 공정특성을 분석한다. 그리고 맨드릴의 형상을 설계하고 공구인 롤의 형상을 설계한다. 또한 제품생산을 위한 공구케적을 설계하고 각종의 공정변수를 추출하여 각각에 대한 조건을 설정한다. 아울러 기계사양 결정에 가장 중요한 가공력과 소요되는 동력을 예측하여 기계제작 사양결정에 반영시키도록 한다.

2. 스피이닝 가공인자의 검토

기본적인 스피이닝 방법에 대하여 가공성은 변형의 특징과 관련하여 한계교축비, 관두께감소율 등으로 구분하여 나타낼 수 있다. 한계교축비는 주로 교축스피이닝에서의 성형성 지표를 나타내며 전단스피이닝에서는 한계단면감소율(두께감소율)로써 성형성을 나타낸다. 이러한 수치들은 스피이닝에서의 결합요소 즉, 성형 도중의 파단현상이나 주름발생에 의해 결정되는 것으로서 여기에는 소재의 소성역학적 특성(연신율, 항복강도, 인장강도, 가공경화 지수, 이방성계수)과 소재의 형상(직경, 두께) 그리고 각종의 가공조건(소재의 회전수, 롤의 직경, 롤의 코너반경, 회전당 이송속도 등)에 영향을 받는다.

2.1 교축스피이닝(Normal Spinning; Conventional Spinning)의 가공조건

그림1과 같이 단순 원통형상의 맨드렐에 소재를 밀어 붙여 컵 형상의 제품을 만드는 교축스피이닝 공정을 단순 교축스피이닝이라 하는데, 이 때 소재의 제품품질 및 가공력, 성형성 등에 미치는 각종 가공조건 인자에는 롤의 형상, 맨드렐의 형상, 롤의 이송속도, 소재의 회전수, 소재의 치수 및 기계적 성질 등이 있다. 교축스피이닝에서의 성형성은 교축비를 통하여 나타내는데, 교축비란 소재의 직경/맨드렐의 직경을 나타내는 것으로 D_0/d 로 표시되며 1회에 성형가능한 교축비는 한계치를 가지는데, 이때의 한계치를 한계교축비라 하며 성형한계의 뜻을 내포하고 있으며 위의 공정변수에 대하여 다음과 같은 영향을 받는다.

(1) 소재형상 및 크기의 영향

소재의 두께/맨드렐의 직경(t_0/d)이 작을때는 주름에 의한 성형한계가 발생하며 t_0/d 가 증가하면 보통 한계교축비는 증가한다. 그러나 t_0/d 가 클때는 술통형태의 부정형이 성형한계를 발생시키게 된다.

(2) 롤 형상의 영향

롤의 직경 자체는 큰 영향을 주지 않으나 롤의 코너부 반경의 영향은 매우 크다. 롤의 코너부 반경이 크면 벽두께가 얇아지는 것을 억제하며 롤과 소재의 접촉부에서 파먹는 현상이 없어지며 롤과 소재가 서서히 접촉하여 주름에 대한 저항이 커져서 한계교축비를 높여 준다.

(3) 이송속도의 영향

가공조건 중에서 영향이 가장 큰 요소로서 롤의 회전당 이송속도가 크면 주름발생이 현저하게 많아진다.

(4) 맨드렐의 영향

맨드렐의 코너부 반경 ρ_M 이 크면 주름발생 가능성 많아지며 ρ_M 이 작으면 파단의 발생 가능성이 높아진다.

(5) 소재회전수의 영향

회전수 (N) 자체는 주름발생에 영향 거의 없으며 회전당 이송속도가 중요하다.

한편, 단순 교축스피이닝에서의 가공력은 전형적으로 그림2와 같은 형태를 취한다.

P_r, P_z, P_θ 는 각각 반경방향(두께방향), 축방향, 원주방향의 3분력을 나타내는 것으로 가공 초기에는 굽힘저항으로 인하여 P_z 가 크며 가공 중기 및 그 이후에는 P_r 이 크다. P_θ 는 상대적으로 다른 두 분력보다 아주 작은 값을 갖는다. P_r 의 경우에는 두 군데에서 높은 값을 갖는데, 첫 번째 Peak는 굽힘변형이 끝날 때 발생되며 P_r 이 최대가 된다. 그리고 두 번째 Peak는 플랜지부의 교축변형으로 인해 두께가 두꺼워질 때 발생하는 것으로, 교축량이 커지면서 소재의 두께가 증가하고 따라서 롤과 맨드릴 사이의 간극보다 소재의 두께가 커지게 되므로 자연이 전단변형과 함께 아이어닝(Ironing) 현상이 발생하여 생기는 현상이다.(가공 말기에 발생)

2.2 전단스피닝(Shear Spinning)의 가공조건

전단스피닝은 연속적이고 국부적인 전단변형만으로 축대칭 쉘 제품을 만드는 것으로 연속적으로 발생시켜 축대칭 쉘(shell) 제품을 만드는 방법으로 그림3에서와 같은 순수전단스피닝에서 가공 후의 제품 두께는 $t_a = t_0 \sin \alpha$ 와 같이 되며 소재의 외곽직경의 변화는 없다. 전단스피닝에서는 외곽직경의 변화가 없으므로 가공율을 벽두께감소율(R_0)로 나타내어 $R_0 = 1 - \sin \alpha$ 와 같이 표시한다. $t_a = t_0 \sin \alpha$ 로 표시되므로 한 번에 가공가능한 두께감소율은 한 번에 가능한 최소의 반원추각 α 로 표시할 수 있으며 보통은 약 15° 의 범위에서 결정된다. 제품의 반원추각이 이보다 작을 때는 2단계의 공정으로 제품을 완성한다.

전단스피닝에서 소재의 제품품질 및 가공력 등에 미치는 각종 가공조건 인자에는 소재의 치수, 기계적 성질, 맨드릴의 형상, 롤의 형상, 롤의 이송속도, 소재의 회전수, 롤과 맨드릴 사이의 간극(clearance), 윤활제, 냉각제 등이 있으며 그 영향은 다음과 같다.

(1) 이송속도의 영향

이송속도가 커지면 3분력 모두 (P_r, P_z, P_θ) 직선적으로 증가하며 P_r 의 증가가 특히 크다. P_θ 는 원점을 지나는 직선형태이나 크기는 상대적으로 다른 두 분력에 비해 상당히 작다.

(2) 롤의 치수의 영향

롤의 직경 (D_R)이 커지면 접촉폭이 증가하여 P_r, P_z 의 크기는 증가하나 P_θ 의 크기는 감소하는데, 대체로 $\sqrt{D_R}$ 의 크기에 비례하여 증감한다. 그리고 롤의 코너반경 (ρ_R)이 증가함에 따라 (P_r, P_z, P_θ)가 모두 증가하는데, P_r 의 증가폭이 크며 P_z, P_θ 의 변화폭은 거의 없다. 롤의 코너반경을 작게 하면 가공력은 감소하나 소재와 롤의 접촉부분 중 코너부를 파먹는 현상이 발생할 수 있다.

(3) 소재의 두께 및 이송속도의 영향

이송속도 및 두께가 증가하면 가공력은 모두 직선적으로 증가하며 기계용량의 선정에 가장 큰 영향을 미친다.

2.3. 교축 전단스피이닝의 가공력

단순교축스피이닝은 두께의 변화를 억제하는 변형이 수반되며 전단스피이닝은 두께의 변화만으로 제품을 생산한다. 그러나 많은 경우에 이 두가지 스피이닝 공정이 조합되는 변형으로 제품가공을 하는데 이때에는 전단변형과 교축변형이 같이 공존하게 된다. 실제로 단순 교축스피이닝에서 맨드렐과 롤 사이의 간극을 조절하면 소재의 두께를 조절할 수 있는데 간극이 두께보다 작으면 벽부의 두께는 원래의 소재 두께보다 작게 되며 전단변형이 수반되어 그림4와 같이 단순 교축스피이닝에서보다 훨씬 높은 가공력이 필요하게 된다.

3. 휠디스크의 가공조건 설계

3.1 가공소재의 기계적 특성

스피이닝에서의 결합요소 즉, 성형 도중의 파단현상이나 주름발생에 대하여 소재의 소성역학적 특성(연신율, 항복강도, 인장강도, 가공경화지수, 이방성계수)은 소재의 형상(직경, 두께) 및 각종의 가공조건(소재의 회전수, 롤의 직경, 롤의 코너반경, 회전당 이송속도 등)과 함께 성형한계에 영향을 미친다. 본 연구에서 휠디스크에 사용되는 재료(SS 400, SAPH 400, SAE 1010~1015) 및 유사강종에 대하여 기계적 특성에 대한 규격을 표 1에 나타내었다.

표 1 휠디스크용 재료 및 유사강종의 기계적 특성

기 호			항복강도 (kg/mm ²)	인장강도 (kg/mm ²)	연신율 (%)	비 고
KS	JIS	SAE				
SS41	SS400		>22	41~52	>23	
SAPH41	SAPH400		>24	>41	>36	
		1010	* C 0.08~0.13, Mn 0.3~0.6			S10C, S12C와 유사강종
		1015	* C 0.12~0.19, Mn 0.3~0.6			
SM10C	S10C		>21	>32	>33	
SM12C	S12C		>24	>38	>30	

3.2 가공조건 설계

1) 소재의 형상

Wheel Disc를 생산하기 위해서는 소재의 치수(두께, 직경)를 먼저 결정해야 한다. Wheel 도면 중에서 Disc 부분만을 따로 그림5와 같이 나타내었다. 그림의 아랫 부분에 있는 Cutting Zone은 성형가공 후에 선삭공정을 통해 제거해야 하는 부분이다. 소재의 두께는 14mm로 선정했으며 직경은 가공된 제품과 체적이 일정해야 하는 조건으로부터 $D_0 = 604.8\text{mm}$ 가 된다.

2) 맨드렐의 형상과 재질

맨드렐의 형상은 제품형상을 따르게 되는데 여기서 코너부의 반경(ρ_M)이 너무 작으면 파단이 발생하므로 너무 작지 않게 적당한 값을 선정해야 한다. 보통 최소한 재료의 두께보다 크게 선정한다. 맨드렐의 재질에 있어 대형의 경우에는 주철을 가공한 후 열처리하여 사용하며 중소형의 경우 공구강을 H_RC 60~63으로 열처리하여 사용하며 표면조도는 되도록 좋게 한다. 재질의 선정기준은 다음과 같으며 본 연구에서 설계된 맨드렐의 형상은 그림6과 같다.

- 10~100 peices - 회주철
- 100~250 peices - 합금주철
- 250~750 peices - 탄소강
- 대량생산 - 공구강

3) 롤의 형상과 재질

중가공용 롤의 전형적인 형태를 그림7에 나타내었는데, 그림7.a)의 경우에는 표준형으로서 교축스피닝 및 전단스피닝에 사용하며 그림7.b)의 경우에는 중하중시 사용하며 도피각은 10° 정도로 한다. 롤의 직경(D_R) 및 코너반경(ρ_R)의 특별한 제한은 없으나 롤과 소재 사이의 접촉압력에 견디어야 하며 기계의 용량과 맨드렐의 형상에 대하여 여러 가지로 채용된다. 맨드렐의 직경이 커진다고 롤의 직경을 키울 필요는 없으며 보통은 제품직경 50~1000mm에 대하여 $D_R=40\sim300$ mm의 값을 선정하는 경우가 많다. 두께(t_0)가 커지면 부하가 많이 걸리므로 커지는 경우가 많은데 이와 같은 중하중용은 복열베어링을 사용하여 롤의 직경이 지나치게 커지는 것을 막는게 좋으며 이때에도 150~300mm 범위가 좋다.

코너반경(ρ_R)은 소재의 두께 및 재질과 관련이 많은데 롤의 코너부 반경은 소재의 두께와 재질 그리고 가공한계 및 가공력을 고려하여 선정해야 한다. ρ_R 은 기본적으로는 소재의 두께보다 크게 해야 하는데, 너무 크면 플랜지부의 직립도에 영향을 주고 너무 작으면 이송속도에 제한을 주며 파단 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 또 한가지의 고려해야 하는 것으로서 제품의 표면상태를 고려해야 하는데, 다음과 같은 표면조도 식으로 검토한다.

$$R_s = \rho_R - \sqrt{\rho_R^2 - (v_n/2)^2}$$

뒤의 절에서도 언급이 되겠지만 표면조도는 코너반경 및 롤의 회전당 이송속도와 서로 상관관계가 있으며 $v_n = 0.6$ mm/rev로 했을 때 ρ_R 에 따르는 표면조도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \rho_R = 10\text{mm} &\rightarrow R_s = 0.0045 \text{ mm}, & \rho_R = 15\text{mm} &\rightarrow R_s = 0.0030 \text{ mm} \\ \rho_R = 20\text{mm} &\rightarrow R_s = 0.0023 \text{ mm}, & \rho_R = 25\text{mm} &\rightarrow R_s = 0.0018 \text{ mm} \end{aligned}$$

롤 중심축의 설치각은 가공력의 합력의 방향에 따라 베어링의 수명을 높일 수 있도록 설정하여야 하며 플랜지와 롤이 접촉하여 간섭을 일으키지 않도록 도피각을 설정하여야 한

다. 도피각의 경우 대개는 $\beta = 10^\circ \sim 30^\circ$ 를 선정한다.

이상의 내용들을 고려하여 롤의 직경을 400mm 정도로 설정하였으며, 롤의 코너반경 (ρ_R)은 15mm 또는 20mm 중에서 선택하도록 했다. 그리고 롤 중심축의 설치각은 20° 로 선정하였으며 도피각 (β)은 10° 로 선정했다. 이러한 내용을 종합하여 롤러의 설치치수의 모식도를 그림8에 나타내었다.

롤의 재질에 있어서는 내마모성 및 COST가 중요한 변수이며 생산량 및 제품품질을 검토하여 다음과 같은 재료에서 선정하는 경우가 많다.

- 냉간가공용 : SK2, SK3, SKD11(H_RC 60~65), 초경, 고속도강(SKH54)
- 열간가공용 : SKD61

본 연구에서는 SKD11(H_RC 60~65)로 선정하였으며 내마모성을 높이기 위해 표면부에 TD처리를 하도록 했다.

4) 성형속도

생산속도를 시간당 약 100개의 제품을 생산하는 것으로 선정하였으며 이로부터 사이클 타임을 약 35초 정도로 선정하였다. 순수가공시간을 약 20초 정도로 선택하고 소재 및 제품의 핸들링시간을 15초 정도로 설정한다.

성형중에 공구인 롤의 궤적을 그림 9에 나타내었으며 롤의 이동에 따른 소재의 변형모습을 그림10에 나타내었다. 전반적으로 A에서 C까지는 교축스파이닝의 변형특성을 가지며 C에서 성형이 완료되는 점(E)까지는 전단스파이닝과 교축스파이닝의 조합된 특성을 갖는다.

그림에서 실질적인 성형가공이 시작되는 곳은 상부의 코너가 시작되는 부분이며 전체 성형부 길이(l_{total})는 다음과 같이 된다.

$$l_{total} = l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5 + l_6 = 155 \text{ mm}$$

실제 작업시에는 롤이 이동을 하게 되므로 롤의 궤적에 따르는 이송거리를 계산하여야 하며 성형이 완료된 상태에서 조금 더 진행하게 되므로 약 192mm 정도로 계산되었다.

롤의 이송속도는 가공조건 중에서 가장 중요한 것으로 가공력, 가공한계(주름, 파단), 제품정도(면조도-R_s)에 직접적으로 영향을 미치며 일반적으로는 다음의 기준을 따른다.

- 실용 이송속도의 범위 : 0.1 ~ 2 mm/rev
- 정삭개념(미려한 표면) : 0.05 ~ 0.15 mm/rev
- 황삭개념(표준) : 0.7 ~ 1.4 mm/rev
- 0.7 mm/rev 이상에서는 밀착성이 우수하다.
- 0.2 mm/rev 이하에서는 표면은 미려하나 밀착성이 나쁘다.

시간당 약 100개의 제품을 생산하기 위해서는 순수 가공시간은 약 20초 범위가 적당하므로 이송속도를 $v' = 10 \text{ mm/sec} (= 600 \text{ mm/min})$ 정도가 적당하다.

맨드릴 회전수의 선정에는 분당 회전수(RPM)와 성형가공부의 주속($U = \pi D_m N$, D_m :

소재의 평균 집축직경)개념으로 검토한다. 어느 경우에는 $U=300 \sim 600\text{m/min}$ 정도가 좋다고 하며 설명하기는 힘들지만 낮은 속도는 좋지 않다고 한다. 회전수의 선정에는 기계의 동력, 작업시의 안전성, 생산성, 소재 및 제품에 대하여 종합적으로 고려해야 하는데 일본에서는 $300\text{rpm} \sim 1000\text{rpm}$ 의 범위에서 많이 사용하며 500rpm 근처가 가장 좋다고 판단하고 있으며 주속으로 선정시 $U=500 \sim 1130 [\text{m/min}]$ 의 범위에서 많이 선정하고 있다.

주속은 또한 제품의 표면상태에도 영향을 미치므로 되도록 일정하게 하는 것이 좋으며, 물의 이송속도가 성형의 가부에 영향을 미치므로 생산성을 높이기 위해서는 회전수를 높이는 것이 유리하다. 이송속도 일정시 회전수를 키우면 회전당 이송량이 작아므로 가공력이 작아지게 된다. 또한 회전 주속을 높이면 윤활효과가 커지는 특징도 있다.

본 연구에서도 500 rpm 근처가 적합한 것으로 판단하고 있는 바, 여기서도 500 rpm 을 선정한다. 그러면 회전당 이송 v 는 다음과 같이 된다.

$$v = \frac{600 \text{ mm/min}}{500 \text{ rev/min}} = 1.2 \text{ mm/rev}$$

이는 물의 이동을 나타낸 것이며 2개의 대향 물을 사용하는 경우에 각각의 상당 이송은 다음과 같이 된다.

$$v_n = \frac{1}{2} v = 0.6 \text{ mm/rev}$$

이는 실용 이송속도의 범위에 있으며 표준 이송속도에 근접하면서 사상 정도를 낼 수 있는 것으로 생각되어 적당한 값이라고 할 수 있다.

성형가공시의 주속으로 환산했을 때 주속의 최대치와 최소치는 각각 628mm/min 및 845mm/min 이 된다. 따라서 $U = 500 \sim 1130 [\text{m/min}]$ 의 범위에 있으므로 적당한 것으로 판단된다.

5) 윤활과 냉각

윤활의 목적은 가공중의 저항감소, 표면조도 개선, 공구수명의 증대, 가공열의 배제, 마찰력의 경감, 맨드렐 및 물의 변형방지에 있다. 윤활제의 선정 기준으로 가공력이 작게 소요되는 교축스피이닝의 경우 석유계, 그리이스, 왁스 등이 사용되며, 보통은 기계유 많이 사용한다. 특히 고하중을 요할때는 비열이 높고 내식성이 우수하며 마찰을 감소시킬 수 있도록 코로이드상의 아연이나, MoS_2 , 왁스 등을 섞어서 사용한다. 본 연구에서도 기계유를 선정한다.

3.3 가공력 및 소요동력

실제의 가공공정 중에는 전단스피이닝이 기본적으로 적용되며 부분적으로 교축스피이닝이 부가된 형태이다.

앞장의 기초검토에 의하면 교축스피이닝에서의 가공력은 전단스피이닝에 비해 상당히 작은 값을 갖는다. 그림9에서 A-B구간은 교축스피이닝이 추가되는 부분이므로 힘의 계산을

생략하고 부하가 많이 걸리는 C-F구간에 대하여 가공력을 계산한다.

계산방식은 전단스피이닝에 대하여 가공력을 계산한 뒤, 교축스피이닝의 부가에 따른 부가가공력에 대한 여유(margin)를 주어 가공력으로 환산하였다.

1) 전단스피이닝에 의한 원주방향 작용력

$t_0 = 14\text{mm}$ 인 소재에 대하여 전단스피이닝할 경우 단순전단 모델에서는

$$P_\theta = t_0 v \cos \alpha \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}}$$

으로 표시된다. 여기서 P_θ 는 원주방향의 가공력이며 t_0 는 소재의 두께이다. α 는 반원추각이며 σ_m 은 Flow Stress이다. 이 식은 von-Mises 항복조건에 따른 것으로 $t_0 = 14\text{mm}$, $(\sigma_m)_{\max} = 52 \text{ kg/mm}^2$ 를 적용한다.

이와 같은 단순전단 모델에서는 물과의 접촉부에서의 곡면부의 변형을 고려하기가 어렵다. 따라서 곡면부의 변형을 고려하여

$$P_\theta = t_0 v \sin \alpha \sigma_m \int d\epsilon$$

의 식을 도입한다. 여기서,

$$\int d\epsilon = \frac{\cot \alpha}{\sqrt{3}} (\nu_1 + \sqrt{1 + \nu_1^2 + \nu_2^2})$$

으로 표시되는데, ν_1, ν_2 는 각각

$$\nu_1 = \frac{t_0 \rho_R}{(r_m \theta_m)^2} \left(\frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} \right), \quad \nu_2 = \frac{2\sqrt{1 - m} \rho_R}{r_m \theta_m} \left(\frac{1 - \sin \alpha}{\cos \alpha} \right)$$

로 표시된다.

θ_m, r_m 은 각각 접촉부에서의 원주방향의 평균접촉각 및 평균반지름을 나타내는 것으로서 $\theta_m = 8.16^\circ = 0.14 \text{ rad}$ 정도로 하며 r_m 은 위치에 따라 다르다. 위의 식에서 ν_2 는 m 에 따라 변하는 수치로서 m 은 0에서 1 사이의 값을 갖는데 보통은 경험적으로 0.2~0.6의 값을 취한다.

2) 반경방향 및 축방향 작용력

소재의 두께방향(법선방향)과 물의 진행방향(접선방향)의 가공력을 각각 P_n, P_t 라 했을 때,

$$P_n = P_\theta \cot \nu_\theta, \quad P_t = P_\theta \cot \nu_\theta \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2}\right)$$

의 관계를 갖는다. P_θ 는 상대적으로 P_n, P_t 에 비해 매우 작으므로 경험적인 수치인 ν_θ 를 도입한 것으로 보통 0.07 근처에서 잘 일치한다.

반경방향 작용력(P_r) 및 축방향 작용력(P_z)은 다음 식으로 나타내어진다.

$$P_r = P_n \cos \alpha_{act} - P_t \sin \alpha_{act}$$

$$P_z = P_n \sin \alpha_{act} + P_t \cos \alpha_{act}$$

여기서 α_{act} 는 실제의 반원추각을 나타낸다.

3) 주축의 소요동력

소요동력 Power는 다음 식으로 나타내어진다.

$$\text{Power} = T\omega = P_{\theta m} \frac{2\pi N}{60}$$

4) 계산 데이터

이상의 내용으로부터 가공력 및 소요동력에 대하여 예측된 결과를 다음 표에 나타내었다.

표 2 가공력 및 소요동력에 대한 계산결과

위치	가공조건		원주방향작용력 P_θ , [kg]	반경방향작용력 P_r , [kg]	축방향작용력 P_z , [kg]	주축의소요동력 Power[kW]
	롤코너반경 (ρ_R)	이송속도 (mm/rev)				
C	20	0.6	207-216	1263-1755	2469-3430	45.6-47.5
	15	0.6	198-203	1204-1411	2354-2760	43.5-44.6
D	20	0.6	252-264	1325-1849	3239-4518	66.9-69.9
	15	0.6	241-248	1266-1736	3094-4243	63.9-65.7
E	20	0.6	370-393	4611-6544	2858-4056	102.1-108.5
	15	0.6	349-363	4349-6034	2696-3740	96.2-100.1
F	20	0.6	416-444	5194-7385	3284-4670	115.0-122.5
	15	0.6	392-408	4891-6795	3093-4297	108.2-112.7

4. 맺는 말

이상과 같이 대형 트럭용 휠디스크를 제조하기 위한 스피이닝머시인의 개발에 앞서 기계의 사양을 결정하기 위한 기초연구를 수행하였다.

기계제작 또는 공정의 적용에 있어 소성가공의 관점에서 검토되어야 하는 사항 즉, 스

피이닝의 기초해석을 통하여 기계의 필요한 사양을 선정하며 공정상의 각종 변수들을 추출하고 각 변수들의 기본적인 데이터를 제시하였다.

스피이닝 공정의 분류에 따른 디스크 제품에 대하여 공정특성을 파악하였다. 제품의 단면의 각도 및 두께가 일정하지 않으므로 교축스피이닝과 전단스피이닝이 복합적으로 조합된 스피이닝으로 분석되었으며 이로부터 기계사양 결정에 가장 중요한 가공력과 소요되는 동력을 예측하였다.

그리고 맨드렐의 형상을 설계하였으며 공구인 롤의 형상을 설계하였다. 또한 제품생산을 위한 공구궤적을 설계하고 이송속도 및 맨드렐의 회전속도 등 각종의 공정변수를 추출하여 각각에 대한 공정조건을 설정했다.

향후에는 가공력의 계산에 있어 보다 실제와 근사시킬 수 있는 해석기법을 개발하여 성형공정 중에 발생할 수 있는 여러 가지 현상을 보다 정확하게 예측하고 여러 불량요인에 대한 검토도 따라야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) M. Hayama, Principles of rotary metal working processes, Kindai Henshu Ltd., 1981
- (2) J. Faulhaber, CNC controlled spinning of truck wheel disks, Metalworking, Industrial & Production Engineering, Vol. 2, 1987, pp. 28-30
- (3) S. Kobayashi, K. Hall and E. G. Thomsen, A Theory of Shear Spinning of Cones, Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, 1961, pp485-495
- (4) 최재찬, 백남주, 김규남, 전단스피이닝 가공의 3분력 해석, 대한기계학회논문집, Vol. 5, 1981, pp.88-93
- (5) S. Kobayashi, Instability in conventional spinning of cones, Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, 1963, pp44-48
- (6) 나경환 외, 신복합 회전소성가공 공정개발, 통상산업부 연구보고서, 1997
- (7) ASM, Metals handbook(8th Ed.) Vol.4(forming), 1969, pp.201-209

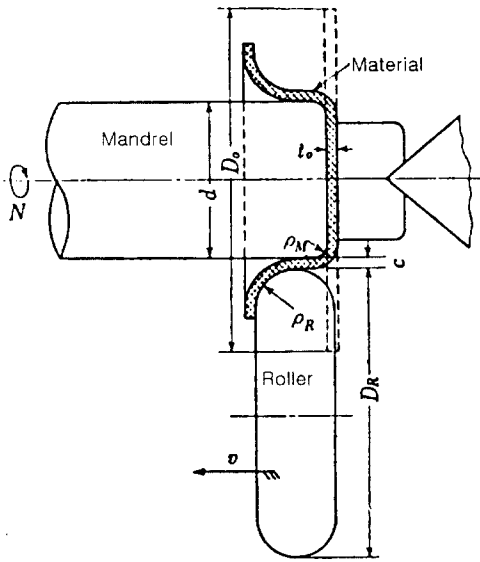


Fig.1 Schematic diagram simple normal spinning

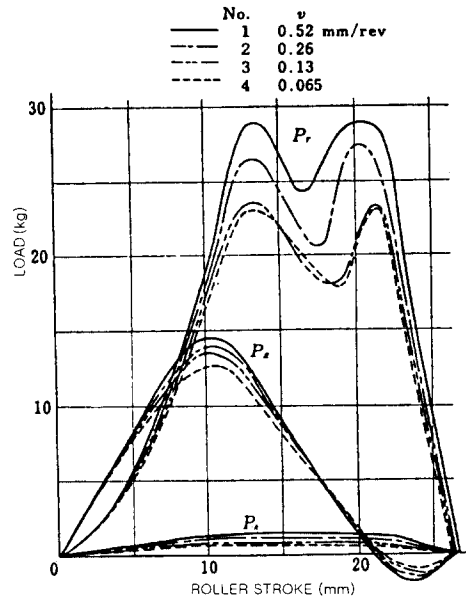


Fig. 2 Relationship between roller stroke and forming load(sample example)

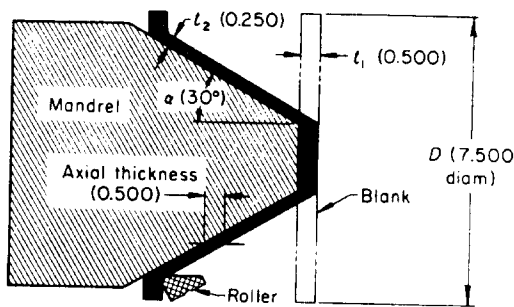


Fig. 3 Diagram of shear spinning

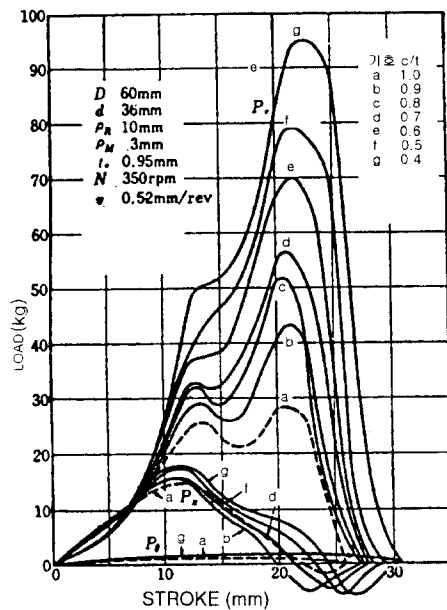


Fig. 4 Load diagram of normal-shear spinning

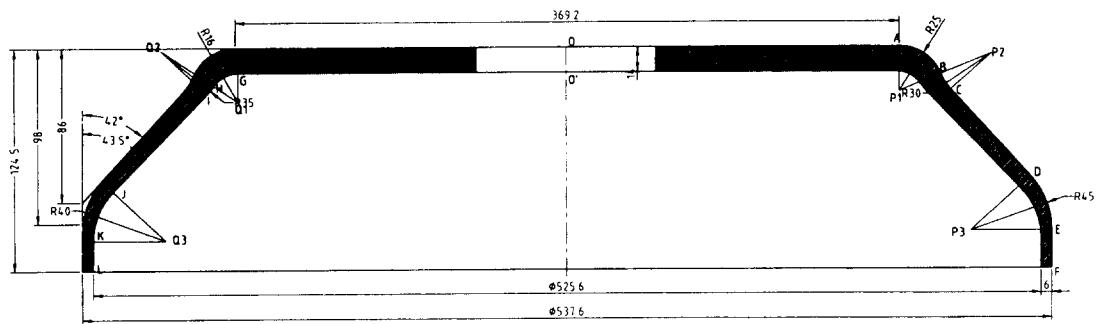


Fig.5 Part drawing of wheel disc

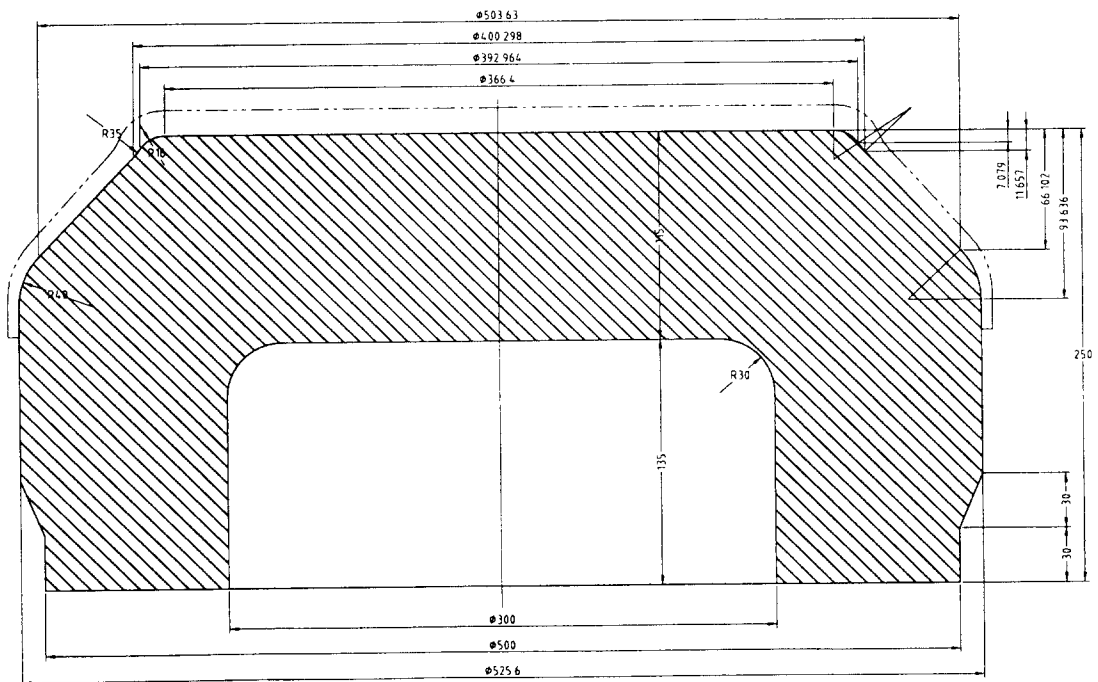


Fig.6 The shape of designed mandrel

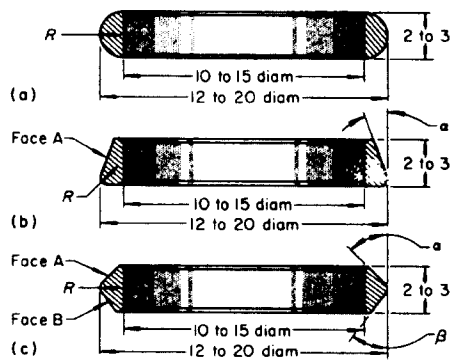


Fig.7 Typical type of forming roller for hard spinning

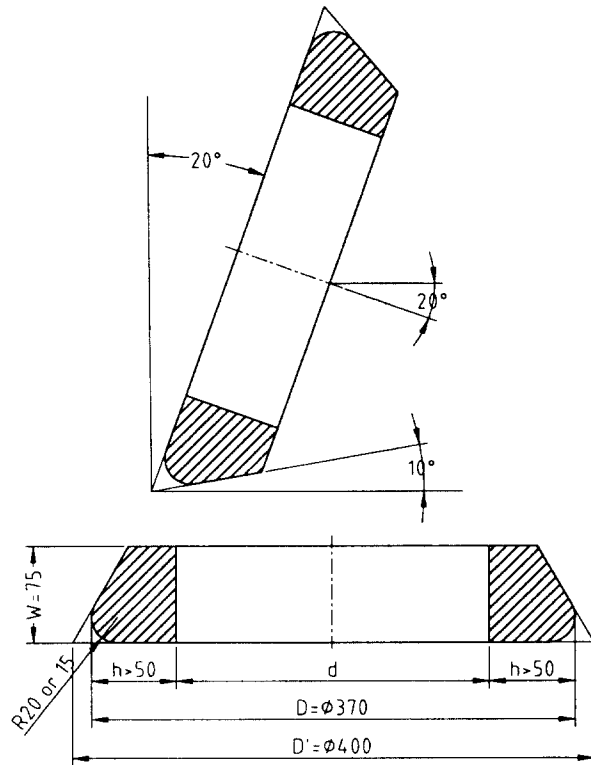


Fig.8 The shape of designed roller

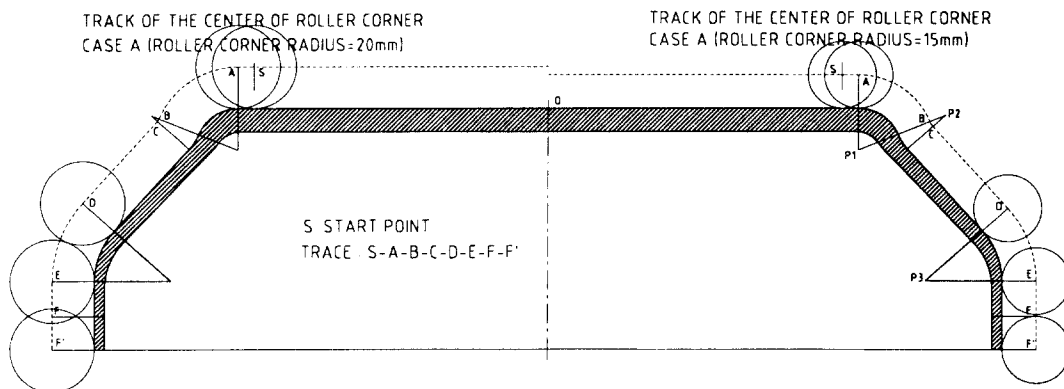


Fig.9 Roller path during disc spinning

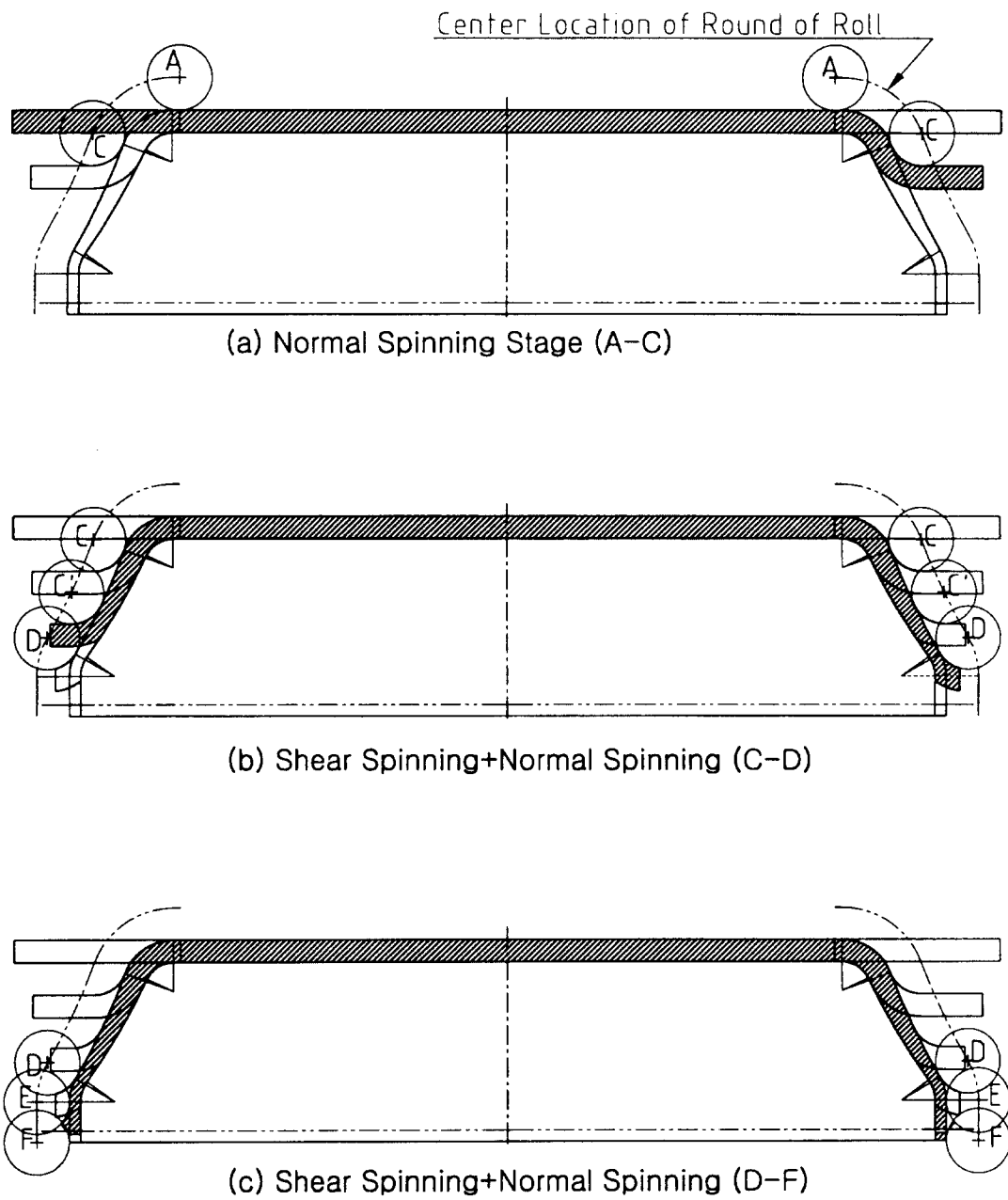


Fig.10 Deformed shape of material at each stage of spinning