

강판재의 보통 스피닝에 대한 성형성 연구

이항수[#]

Experimental Study on the Conventional Spinnability of Steel Sheets

H. S. Lee

(Received November 2, 2005)

Abstract

This study is related with the development of CNC spinning machine and the axisymmetric conventional spinning such as drum type and conical type steel shells. The CNC spinning machine is constructed with heavy duty frame and the hydraulic servo system is applied in order to give the exactness of motion control. The experiment has been carried out considering feeding velocity, mandrel shape, and the corner radius of mandrel and forming rollers. As a result of experiment, the limiting spinning ratio and thickness strain distribution are obtained and it can be seen that the spinnability is dominant to the feeding velocity and corner radius of forming roller. This research can contribute to the development of axisymmetric mechanical part which is applicable to automotive and aerospace industry.

Key Words : Conventional Spinning, Axisymmetric Steel Shell, CNC Controlled Spinning Machine, Spinnability

1. 개 요

금속판재의 성형가공 중에서 편치 및 다이 등을 사용하지 않고, 원추형 또는 반구형 등의 축대칭 맨드렐에 소재를 고정시킨 후 회전시키는 가운데 성형롤러나 주걱을 이송시켜 점진적으로 소재를 맨드렐에 밀어 붙여 맨드렐과 같은 형상의 제품으로 성형하는 소성가공법을 스피닝이라 한다. 스피닝에는 평판을 셸(shell) 제품으로 만드는 보통 스피닝(conventional spinning)과 전단스피닝(shear spinning)이 있다. 재래적인 스피닝은 정밀도가 높지 않은 단순형태의 제품에 적용되어 왔으나 관련기술의 발달과 함께 활용도가 점점 높아지고 있다. 오늘날에는 가정용품에서부터 전기용품, 기계부품, 자동차부품, 군수산업부품, 원자력 산업부품, 우주항공분야 등 거의 모든 산업분야

전반에 걸쳐 유용하게 적용되고 있다. 특기할 만한 사항은 강판을 활용한 자동차의 구동부품 생산에도 응용이 확대되고 있다는 점이다. 예를 들어, 대형 트럭의 휠의 경우 기능상 피로수명의 향상 목적으로 스피닝을 적용하고 있으며, 자동변속기의 여러 부품들이 스피닝의 활용가능 부품이다. 또한 각종 폴리 등에 대하여도 부품의 경량화, 고기능화 추세에 따라 부분적으로 스피닝이 적용되고 있다.

그러나 자동차 부품산업의 경우 아직 스피닝을 적용하는 부품은 비교적 적은 상태이다. 여기에는 부품업체의 영세성과 함께 기술적 특성을 이해하지 못한 것도 큰 이유라 할 것이다. 일반적인 프레스성형이나 기타의 공법들에 대해서는 일찍부터 산업수요가 많아서 널리 확산되어 있으나, 고품질의 스피닝에 대해서는 아직 실용성을 확보하

[#] 교신저자 : 한라대학교 기계자동차공학부,
E-mail : hslee@hit.halla.ac.kr

지 못하고 있다. 그러므로 관련산업의 기술경쟁력을 높이기 위해서는 고품질을 위한 스피닝 기술의 개발이 다양하게 수행되어야 할 것이다.

스피닝에 대한 기초연구는 일찍부터 발표되었으며 최근에는 제품개발 사례가 많이 발표되었다. Kobayashi 등[1~2]은 알루미늄의 전단스피닝과 보통 스피닝의 가공성에 대하여 발표하였다. Hayama 등[3~4]은 알루미늄재의 스피닝 공정 중에 발생하는 가공력의 해석과 여러 가지 가공조건에 대한 역학적 변수의 영향을 조사하였다.

근래에는 제품화 과정에서의 개발사례에 대한 연구들이 발표되었다[5-6]. 국내에서는 최재찬 등[7]이 전단스피닝의 가공력 해석을 위한 연구를 바탕으로 스피닝 연구를 시작하였다. 나경환 등[8] 중소기업 지원을 목적으로 스피닝머시인을 개발하였으며, Kang 등[9]은 대형트럭용 휠디스크를 생산하기 위한 스피닝 성형기를 개발한 바 있다. 한편, 본 저자는 전단변형과 교축변형을 중심으로 하는 복합스피닝 공정에 관한 이론연구를 진행하였으며[10], 기계부품의 개발을 목적으로 실험용 CNC 스피닝머시인을 개발한 바 있다[11].

이러한 연구내용을 바탕으로 스피닝공정에 대한 기술적 진보가 이루어지기는 했지만 재료에 있어서 기계부품으로 사용하는 강판에 대한 연구는 매우 빈약하다. 따라서 강판재의 스피닝공정 개발시 활용할 수 있도록 강판에 대한 스피닝 성형성과 아울러 제반 현상을 분석할 필요가 있다. 이러한 관점에서 본 연구의 목적은 강판을 이용한 스피닝에 대한 성형성 자료를 확보하고 공정 변수에 대한 영향을 조사하여 향후 강판을 활용하여 실제 제품개발 시 활용할 수 있도록 하는 것이다.

2. 실험

2.1 스피닝 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 본 저자가 제작한[11] CNC 형 스피닝머시인으로서, 기계부분의 사양은 가공품의 크기, 동작방식, 제어방식 등을 기본으로 구성하였으며 이중 중요한 내용을 다음 표에 나타내었다.

X-Y 테이블(saddle) 이송은 유압서보 제어(hydraulic servo control)방식을 채택하였으며, 그래픽 또는 좌표값의 지정으로 공구가 이송되도록

Table 1 Specification of spinning machine

Center height	1050mm
Distance between centers	620mm
Workpiece length, max	600mm
Workpiece diameter	50-480mm
Longitudinal travel of saddle	300mm
Transverse travel of saddle	300mm
Longitudinal thrust of saddle	160kN
Transverse thrust of saddle	160kN
Speed of saddle, variable	0-1.5m/min
Tail stock stroke	300mm
Tail stock thrust	250kN
Ejector stroke	50mm
Ejecting force	40kN
Speed of main spindle	583rpm
Hydraulic motor	11kW

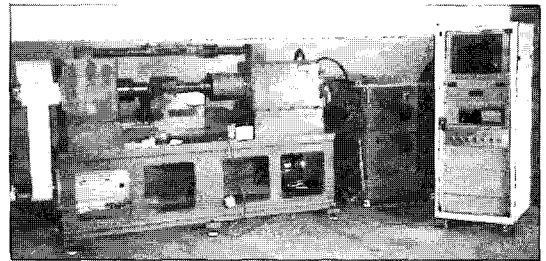


Fig. 1 Photo of spinning machine developed

CNC 프로그래밍이 가능한 컨트롤러를 제작하였다. 좌표값의 변곡점마다 가공정보(이송속도 등)를 조절할 수 있도록 하였으며, 보간기능에 있어서는 보통의 NC 공작기계에 사용되는 직선보간, 원호보간 이외에 인볼류트 곡선을 창성하도록 하여 스피닝의 특성을 가진 제어가 가능하도록 하였다.

최소위치 설정단위(BLU)를 0.005mm 로 하였으며, X-Y 테이블의 위치제어 정밀도를 $\pm 0.03\text{mm}$ 이내로 제어가 가능하도록 하였다.

Fig. 1은 제작된 기계의 전경을 보여주고 있으며, Fig. 2 및 Fig. 3은 스피닝시의 가공공간과 공구(roller)가 장착된 X-Y 테이블을 보여주고 있다.

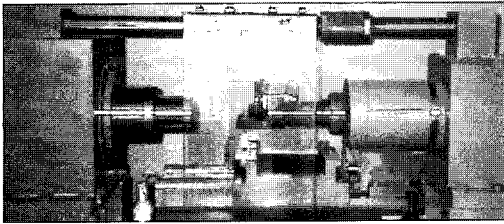


Fig. 2 Working space of CNC spinning machine

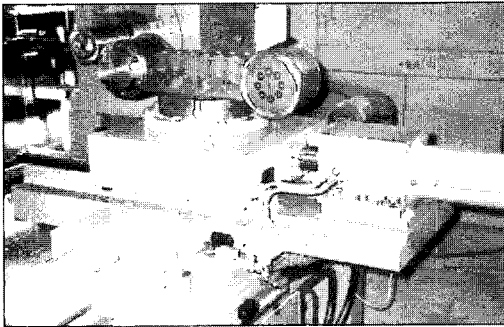


Fig. 3 X-Y table of spinning machine

Table 2 Results of tensile test

Yield strength(MPa)	190.51
Tensile strength(MPa)	291.45
Elongation(%)	48.97
R-value	1.8
Work-hardening(MPa)	$\bar{\sigma} = 506.2\bar{\epsilon}^{0.22}$

2.2 재료시험

실험에 사용된 재질은 KS 규격으로 SCP1 종이며 두께는 2mm 이다. 사용된 재료에 대하여 인장시험을 수행하였으며, 인장시험편 규격은 KS 5B 호(KS B 0801)이다. 시험편은 압연방향에 대하여 0° (압연방향), 45°, 90° 로 채취하였으며 인장속도는 30mm/min 으로 설정하였다. 이방성은 공칭 변형률 기준으로 13% 일 때 측정하였다.

이에 대한 인장시험 결과를 Table 2 에 나타내었다.

2.3 스피닝 실험

본 실험의 성형가공모식도를 Fig. 4 에 나타내었다. 그림에서와 같이 맨드렐을 주축에 고정하고 원형의 강판을 맨드렐에 고정하여 주축과 함께 회전시키는 가운데, 성형롤러를 이송시켜 제품을

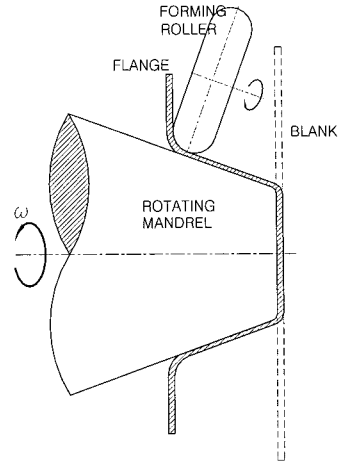


Fig. 4 Schematic diagram of conventional spinning for the axisymmetric shells

Table 3 Test conditions of spinning

		Standard condition	Variable condition
Mandrel	Diameter(D_M , mm)	80	-
	Corner-R(ρ_M , mm)	5	10
	Conical angle(2α)	0°	20°, 40
Roller	Diameter(D_R , mm)	160	-
	Corner-R(ρ_R , mm)	5	2, 7, 10
Feeding velocity(V_R , mm/rev)		0.8	0.4, 1.6
Clearance(c, mm)		2.5	-

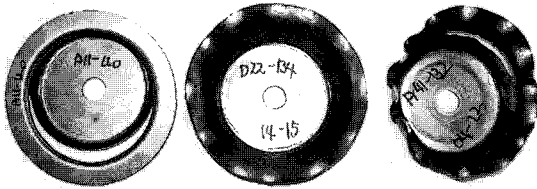
성형한다.

맨드렐의 회전속도를 일정하게 유지시킨 가운데 1 회 사이클(single cycle spinning)로 성형을 완료하였다. 맨드렐의 회전속도는 583 rpm 으로 일정하게 유지시켰으며, 윤활에 있어서는 무윤활 조건을 적용시켰다. 맨드렐과 성형롤러에 대한 작업조건은 Table 3 과 같다.

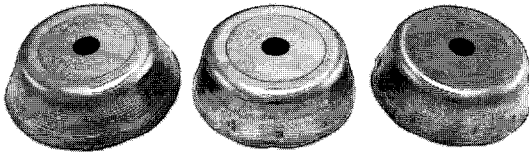
스피닝 가공조건에 대해서는 롤러의 이송속도, 롤러 코너반경, 맨드렐의 코너반경, 소재와 맨드렐 사이의 간극(clearance)에 대하여 검토하였으며, LDR(limiting drawing ratio, limiting spinning ratio)로 대표되는 성형성과 두께분포, 표면품질 등에 관측의 주안점을 두었다.

3. 실험결과 및 토론

실험에 사용된 소재는 두께가 2mm 인 SCP1 종의 강판으로 스피닝된 제품 사진을 Fig. 5 에 나타내었다.



(a) Failure(wrinkling and fracture)



(b) Surface defects

Fig. 5 Photo of spun cups with defects

이들 그림은 성형성 관련 불량현상과 표면결함으로 분류하여 나타낸 것으로, 성형성을 결정짓는 요소에는 파단과 주름현상이 있다. 주로 발생하는 결함은 주름현상으로 한계스피닝비의 주 결정요인이다.

파단현상은 롤러의 코너반경이 작은 경우에 나타나는 현상과 주름현상이 심해져서 이에 따르는 종방향 응력이 커져서 발생하는 현상이 있다.

이 모두가 한계스피닝비를 결정짓는 요소로서 각 공정변수에 대한 한계스피닝비(LDR)의 분석이 필요하다.

스피닝시의 표면결함은 주로 롤러코너반경의 대소에 따라 발생하며 직접적인 성형성 결정인자는 아니지만 제품 품질과는 밀접하다.

Fig. 6 은 한계스피닝비(LDR) 및 두께변형을 측정 시 사용되는 각종의 파라미터를 설명하기 위한 그림이다. 이 그림은 맨드렐에 대하여 직경(D_M) 및 코너반경(ρ_M), 반원추각(α_M)을 정의하고 있으며, 롤러에 대해서는 코너반경(ρ_R) 및 이송속도(V_R)를 정의하고 있다. 또한 스피닝된 시험편에 대해서는 각 측정위치(P_i)에 대한 높이(z) 및 반경

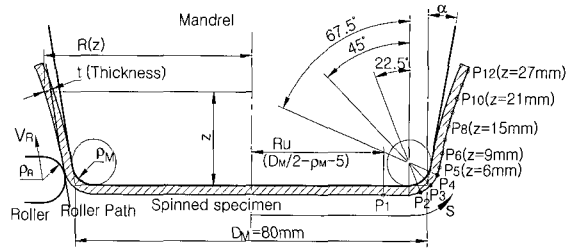


Fig. 6 Geometric description of spinning parameters

($R(z)$), 두께(t) 등을 정의하고 있다.

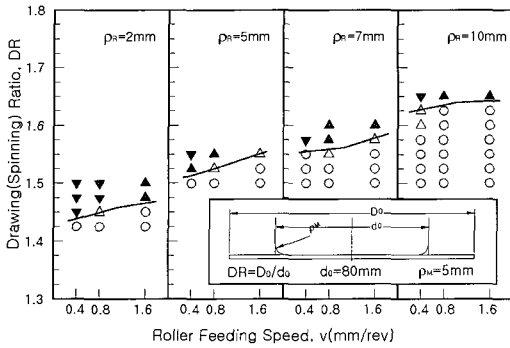
Fig. 7 은 드럼형 및 원추형 스피닝에 대하여 공정 중 발생하는 주름과 파단현상으로부터 한계스피닝비를 조사한 그림이며 Fig. 8 은 이를 종합하여 나타낸 그림이다. Fig. 7 에서 ▼표시는 파단을 나타내며, ▲표시는 주름(wrinkling)이 발생했음을 나타낸다.

이들 그림을 고찰하면, 드럼형의 경우 맨드렐 코너반경이 클 때 성형성이 우수해짐을 알 수 있으며, 원추형의 경우에는 원추각이 클수록 성형성이 우수함을 알 수 있다. 또한 전체적으로는 원추형이 드럼형보다 성형성이 우수하다. 롤러코너반경과 함께 비교하면, 롤러코너반경이 작은 경우 맨드렐에 따른 성형성 차이가 많이 나며 롤러코너반경이 큰 경우에는 성형성 차이가 상대적으로 작다. 따라서 성형성을 높이기 위해서는 롤러코너반경을 크게 하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

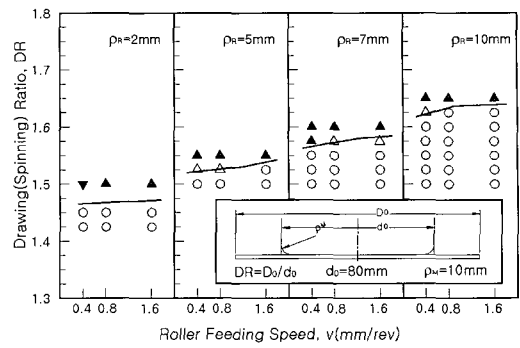
특징적인 점은 드럼형의 경우(특히 맨드렐코너반경이 작은 경우)에 롤러코너 반경의 영향이 큼을 알 수 있는데, 이는 롤러코너 반경이 작은 경우 굽힘저항이 커지면서 전체적으로 성형성을 불리하게 하는 것으로 판단된다.

다음은 두께변형에 대한 고찰이다. Fig. 9~Fig. 12 는 각 조건별로 시험된 시험편의 두께를 측정하여 두께변형률로 환산하여 나타낸 그림이다. 두께의 측정위치는 Fig. 6 에 나타낸 P_i 의 위치이며, 측정방법은 끝이 뾰족한 마이크로미터(pointer micrometer)를 사용하였다.

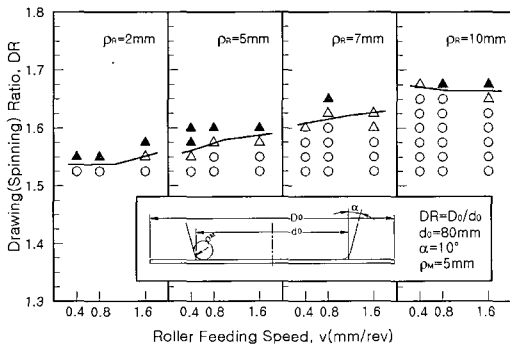
우선 원통형에 대하여 고찰한다. 기본적으로는 모든 경우에 맨드렐 코너부에서 약간의 두께감소가 발생하며 드럼의 벽부에서 많은 두께감소가 일어난다. 또한 끝단부에서는 초기 두께보다 두꺼워지는 경향을 보인다.



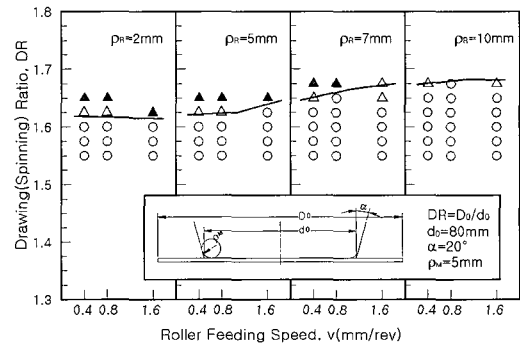
(a) Drum type ($\rho_M=5\text{mm}$)



(b) Drum type ($\rho_M=10\text{mm}$)



(c) Conical type ($\alpha_M=10^\circ$)



(d) Conical type ($\alpha_M=20^\circ$)

Fig. 7 Comparison of limiting spinning ratio(LDR)

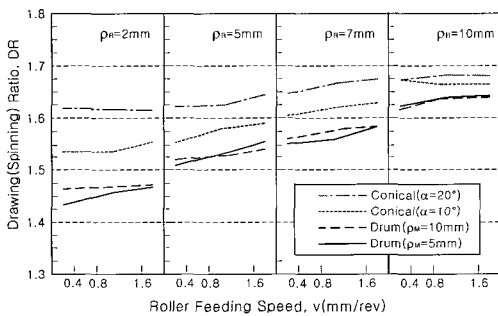
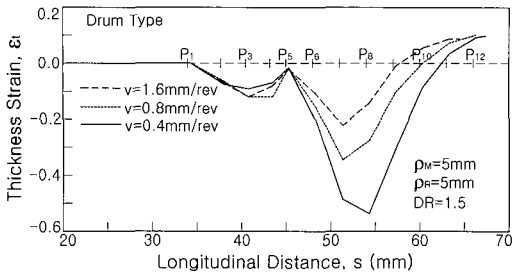


Fig. 8 Comparison of LDR at each condition

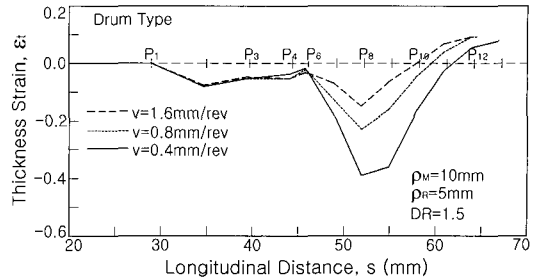
이송속도에 따른 비교에서 이송속도가 작아지면 벽부 두께감소가 커지는데, 이송속도가 0.4mm/rev 인 경우에는 두께가 절반정도로 얇아짐을 확인할 수 있다. 맨드릴 코너부에서는 약간의 차이지만 이송속도가 작은 경우가 두께감소가 적음을

확인할 수 있다. 소재직경의 영향비교에서 스피닝 비가 클수록 두께감소가 커지는데 이는 일반적인 다른 소성가공법(디프드로잉 등)에서와 마찬가지로의 결과이다. 롤러코너반경의 영향도 매우 크다. 롤러코너반경이 2mm 인 경우는 파단이 발생하여 두께변형률 데이터가 없는 만큼 두께변화가 심했음을 알 수 있다. 롤러이송속도의 비교에서 맨드릴코너부의 두께감소량은 서로 차이가 없으며, 벽부에서의 두께감소는 이송속도가 작아지면 크게 나타난다.

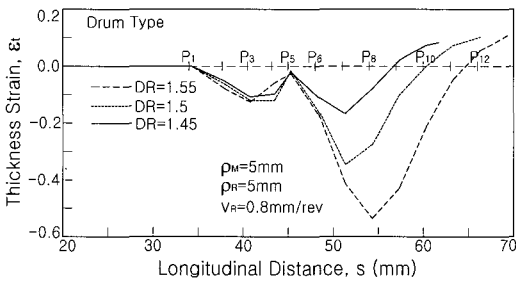
원추형의 결과에서도 맨드릴코너 부근에서 두께감소가 발생하다가 계속하여 벽부로 가면서 두께감소가 커지나, 끝단부로 가면서는 두께감소가 작아지고 끝에서는 오히려 두께가 증가하는 경향이다. 롤러이송속도의 영향은 앞의 드럼형의 경우와 비교하여 차이가 상대적으로 적으며 전체적인 두께변형률 분포의 형태는 비슷하다. 안정적인 성



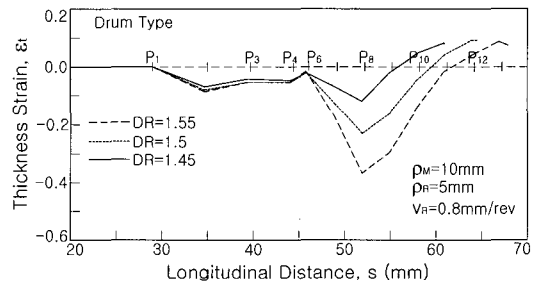
(a) Comparison of feeding velocity



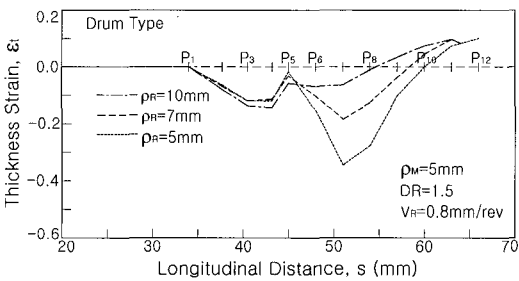
(a) Comparison of feeding velocity



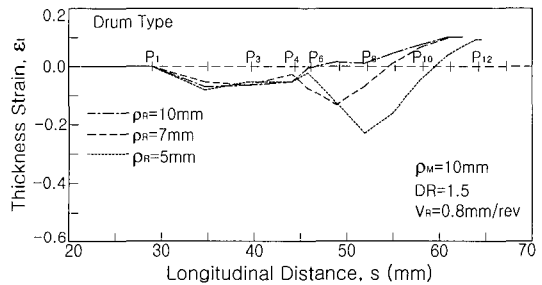
(b) Comparison of spinning ratio



(b) Comparison of spinning ratio



(c) Comparison of roller corner radius



(c) Comparison of roller corner radius

Fig. 9 Thickness distribution of spun shells at the case of drum type($\rho_M=5\text{mm}$)

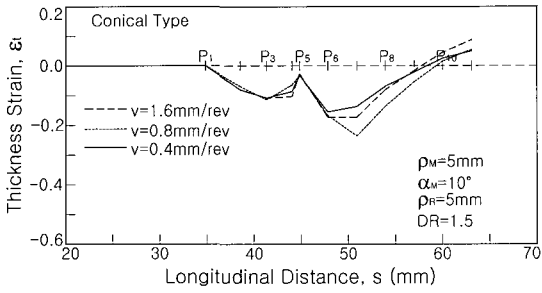
Fig.10 Thickness distribution of spun shells at the case of drum type($\rho_M=10\text{mm}$)

형범위의 경우이므로 이송속도가 커질 때 두께변형률이 더 커지는 현상을 보인다. 소재 직경의 영향은 앞의 경우와 동일하다. 두께변화의 정도 역시 드립형과 비슷하며 변형패턴 역시 동일한 형태를 갖는다. 롤러코너반경의 영향은 다른 변수의 영향과 비교하여 상대적으로 매우 큼을 알 수 있다. 롤러코너반경이 2mm 인 경우에는 두께변형률이 약 -0.6 을 보이는데, 이 경우에는 현실적으로

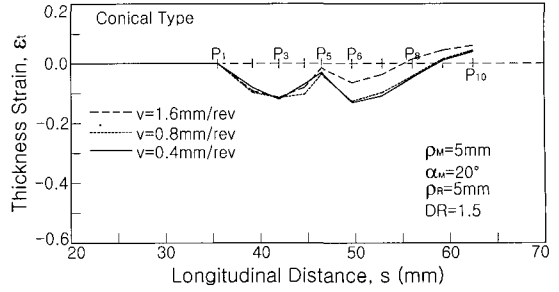
제품을 생산할 수 없는 경우라고 판단된다.

4. 결론

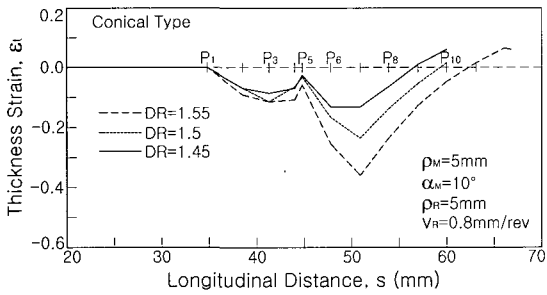
컴퓨터에 의한 수치제어형 스피닝머시인을 개발하여 대표적인 형상으로 생각되는 원통형 및 원추형 제품에 대한 보통스피닝 실험을 수행하였다. 개발된 스피닝머시인은 실제 부품을 개발할수



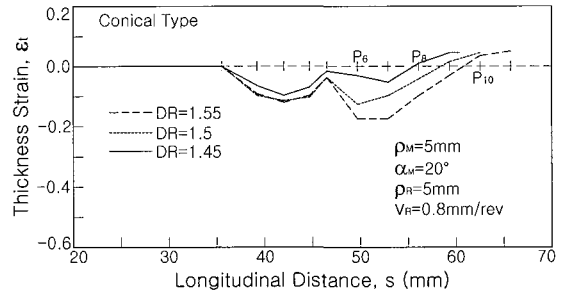
(a) Comparison of feeding velocity



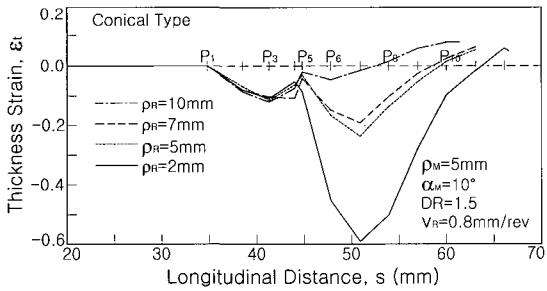
(a) Comparison of feeding velocity



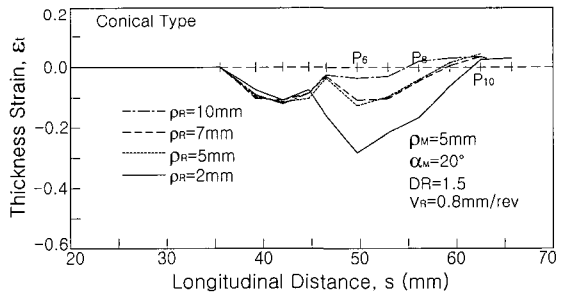
(b) Comparison of spinning ratio



(b) Comparison of spinning ratio



(c) Comparison of roller corner radius



(c) Comparison of roller corner radius

Fig.11 Thickness distribution of spun shells at the case of conical type ($\alpha_M=10^\circ$)

Fig.12 Thickness distribution of spun shells at the case of conical type ($\alpha_M=20^\circ$)

있도록 고출력의 유압서보제어 방식으로 제작하였으며, 스피닝 실험의 용이성을 위하여 인볼류트 곡선을 생성할 수 있는 CNC 를 제작하였다. 실험에는 대표적인 냉간압연강판을 소재로 하여 원통형 및 원추형 제품에 대한 보통스피닝 실험을 수행하였다. 실험결과로서 한계스피닝비에 대한 영향요소를 분석하였다. 한계스피닝비는 파단 및 주름현상에 의해 결정되며, 파단보다는 주름현상이

주 요소임을 확인하였다. 각 조건별로 두께변형률 분포를 조사하여 이송속도가 적정한 범위에서 두께변화가 작음을 알았으며, 롤러코너반경이 너무 작으면 두께감소가 지나쳐서 파단의 위험이 있음을 알았다.

이러한 연구내용은 향후 자동차부품 또는 항공 우주산업의 부품개발 시 스피닝의 적용성을 판단하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] S. Kobayashi, I. K. Hall, E. G. Thomsen, 1961, A Theory of Shear Spinning of Cones, Trans. ASME, J. Engineering for Industry, pp. 485~495.
- [2] H. C. Sortais, S. Kobayashi, E. G. Thomsen, 1963, Mechanics of Conventional Spinning, Trans. ASME, J. Engineering for Industry, pp. 346351.
- [3] M. Hayama, 1975, Analysis of Working Forces in Shear Spinning of Cones, JSTP, Vol.16, No.175, pp. 627~635.
- [4] M. Hayama, T. Amano, 1975, Experiments on the Mechanism of Shear Spinning of Cones, JSTP, Vol.16, pp. 371~378.
- [5] J. Faulhaber, 1987, CNC Controlled Spinning of Truck Wheel Disks, Industrial & Production Engineering, Vol.11, pp. 28~30.
- [6] D. H. Pollitte, 1982, Automatic Spinning-A Production Technique, Sheet Metal Industry, pp. 518~538.
- [7] 최재찬, 백남주, 김규남, 1981, 전단스피닝 가공의 3 분력 해석, 대한기계학회논문집, 제 5 권, 제 2 호, pp. 88~93.
- [8] 나경환, 고명환, 임태홍 외, 1997, 중소기업 지원형 전용 스피닝공정 개발, 한국생산기술연구원 연구보고서, 95-A-1-0046.
- [9] 강정식, 강이석, 이항수, 1999, 휠디스크 스피닝 성형기 개발, 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 6 호, pp. 58~65.
- [10] 이항수, 강정식, 1999, 전단 및 교축변형이 조합된 복합스피닝 공정에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제 8 권, 제 5 호, pp. 507~519.
- [11] 이항수, 2002, 자동차부품 제조를 위한 실험용 스피닝머신 개발, 한국소성가공학회 2002 춘계학술대회논문집, pp. 117~120.