

자동차용 냉간압연재의 드로우비드 성형시 비드 형상별 마찰특성에 관한 연구

김동우*, 김원태*, 이동환*, 문영훈*
정밀기계공학과, 부산대학교*

Study on the Friction Characteristics of Circular bead and rectangular bead in Drawbead Forming of Cold Rolled Steels for Automotive Parts

D. W. Kim*, W. T. Kim*, D. H. Lee* and Y. H. Moon*

Department of Mechanical & Precision Engineering, Pusan National University**

Abstract

The drawbead is one of the most important factors in sheet metal forming for automotive parts. So clarifying the friction characteristics between sheets and drawbead is essential to improve the formability of sheet metal. Therefore in this study, drawbead friction test was performed at circular shape bead and rectangular shape bead. The results show that the tendency of drawing force for rectangular bead is nearly similar with circular bead and the drawing force is nearly proportional to friction coefficient.

Key words : drawing characteristics, friction coefficient, circular shape bead, rectangular shape bead,

1. 서론

박판성형을 하는데 있어서 성형 중에 판재와 공구사이에 발생하는 마찰은 성형 건전성 및 제품의 품질에 큰 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다. 특히 자동차 차체와 같은 복잡한 형상의 대형 패널을 성형할 때에는 주름(wrinkle)과 파단 및 탄성회복을 방지하고 강성을 증가시키기 위해 재료의 흐름을 제어하고 장력을 부가해 줄 수 있는 드로우비드의 설치는 필수적이다. 따라서 소재와 공구(비드) 사이의 마찰현상에 대해 명확히 규명하는 것은 제품의 성형성을 향상시키기 위한 필수불가결한 요소이다.

박판 성형시 발생하는 마찰에 영향을 미치는 인자들 중 소재 내적인 요인으로 표면 조도 및 경도를 포함한 여러 물성치들을 들 수 있겠고 공구의 기하학적 형상, 윤활상태, 편치속도, 블랭크 홀딩력 등을 외적인 요인으로 들 수 있겠다. 마찰거동은 이러한 여러 내외적 요인들의 복합적 영향의 결과이므로 그 현상 역시 매우 복잡하고 다양하게 나타난다. 따라서 박판 성형중에 마찰에 영향을 미치는 모든 인자들을 마찰계수로 정량화 하는 것은 매우 어렵고 이러한 어려움으로 인해 지금까지의 마찰 연구는 비교적 간단한 실험을 통한 마찰의 정성적 특성 비교에 주안점을 두어 왔으나 이러한 것으로 복잡 다양한 마찰현상을 설명하기에는 많은 문제점들이 있다. 특히 최근의 자동차 산업이 발달함에 따라 철강업계와 자동차 회사에서는 종전에 많이 사용하던 냉연 무도금강판 대신에 부식에 저항력이 강한 다양한 표면처리된 재료들을 개발하여 사용하게 되었고 이러한 과정에서 냉연(CR) 강판의 가공시에 야기되지 않았던 많은 문제점들이 나타나게 되었다.

지금까지의 박판재의 성형작업 방법으로는 주로 금속편치와 다이와의 접촉성형에 의한 것이 대부분인 실정이다. 하지만 이러한 다이, 판재, 편치의 접촉에 의한 판재 성형시에는 접촉으로 인한 표면 불량 발생하여 이것을 줄이기 위한 액압성형, 가스성형, 폭발성형등의 연구가 최근에 활발히 진행 중에 있다. 드로우비드에 관한 연구는 드로우비드 저항력과 인출시의 변형률을 구하는데 집중되어 왔으며 이를 시대별로 간략하게 살펴보면 다음과 같다. 드로우비드에 대한 본격적인 연구는 1978년경 Nine에 의해 시작되었다. Nine은 단일원형 드로우비드를 대상으로 인출력과 드로우비드부를 통과하는 소재의 상, 하부표면의 변형률 분포를 알아보았고, 마찰계수를 구하는 방법 등을 제안하였다. Wang은 원형 비드의 수학적 모델을 제시하고 저항력을 유도하였다. 수학적 모델에서 곡률반경에 따른 굽힘, 미끄러짐, 뒤굽힘을 작용력의 모멘트 평형 조건을 도입하여 드로우비드 저항력을 계산하였다.

요즘 널리 이용되고 있는 박판 성형해석 프로그램에서 드로우비드 저항력은 해석 정확도에 크게 영향을 주기 때문에 신뢰도를 높이기 위해서 현재 현장에서 사용되고 있는 드로우비드 별로 정확한 드로우비드 저항력을 구하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

본 논문에서는 Nine에 의해 제안된 마찰계수 식을 원형비드에 적용하여 그에 따른 마찰계수와 가압하중에 대한 드로잉 하중의 관계를 밝히고 접촉 면적이 불균일하여 마찰계수 식을 적용하기 어려운 사각비드에서의 마찰경향을 원형비드의 마찰경향과 비교하여 보려 한다.

2. 실험내용

2.1 실험방법

본 실험에서는 Nine에 의해 고안된 원형단면을 갖는 고속 드로우비드 마찰시험기를 사용하여 주철(iron)과 주강(steel) 재질의 원형비드와 사각비드를 사용하였으며, 각 비드별로 미처리, 크롬도금(Cr plating)의 2종류의 표면처리를 하여 그에 대한 드로우비드 저항력과 마찰계수에 미치는 공정인자의 영향을 파악하였다. 실험에 사용된 드로우비드 마찰 시험기는 Fig. 1에 나타내었고 드로우비드 마찰 시험기의 롤러비드부와 고정비드부를 Fig. 2에 나타내었다.

마찰 실험은 먼저 두께 0.7mm에서 1.2mm의 마찰시편을 코일의 압연방향으로 폭 45mm X 길이 500mm 크기로 전단하여 가장자리 버어(burr)를 제거하고 평가하려는 표면처리의 비드를 설치하고 윤활유를 적당하게 도포한 후 시편의 한쪽 끝을 실험장치의 인장 척에 체결한다. 이후 시편을 비드로 가압하고 1000 mm/min 의 속도로 롤러비드와 고정비드를 각각 70mm 씩 드로잉하여 변위-하중 곡선을 획득한다. 이 곡선에서 드로잉 거리 40 ~ 60mm 에서 로드 셀에 의해 측정되어진 드로잉 하중 및 비드의 가압력을 측정하여 평균값을 취하였으며 실험의 편차를 줄이기 위해 2회 반복 실시하였다.



Fig. 1. Schematic view of drawbead tester



Fig. 2. Roller and fixed bead parts of drawbead tester

2.2 실험 조건

비드는 주철재질인 FC300과 주강재질인 SKD11의 원형비드와 사각비드를 미처리, 크롬도금(Cr plating)의 표면처리를 한 비드를 각각 사용하였으며, Table 1에 비드 재질의 화학조성을 나타내었다. 두께 0.7mm ~ 1.2mm 의 냉연(CR) 강판, 합금화용용 아연도금(GA) 강판, 전기아연도금(EG) 강판 및 알루미늄(Al) 강판을 대상으로 실험을 하였다. 비드는 반경이 4.76mm이고 이 비드 반경은 통상 스탬핑 공정에서 사용되고 있는 드로우비드에 대한 대표적인 값으로 볼 수 있다. 구체적인 실험조건은 Table 2에서 Table 4에 나타내었다.

2.3 실험의 이론적 배경

Fig. 3에서 보듯이 롤러비드와 고정비드에 의한 마찰실험을 수행할 때 고정비드는 소성변형에 의한 변형하중과 마찰하중을 모두 포함하는 반면, 롤러비드는 회전하기 때문에 마찰하중없이 변형하중만 포함하게 된다. 그러므로 고정비드와 롤러비드에서 측정 되어진 하중의 차이를 이용하여 드로우비드의 마찰 저항력을 구할 수 있다. 이 마찰저항력과 클램프의 마찰법칙을 이용하여 다음과 같이 마찰계수 μ 를 도출할 수 있다.

드로우비드 시험기에서 측정되는 마찰하중은 고정비드에서의 드로잉하중에서 롤러비드에서의 드로잉 하중을 제거한 값이 된다. 따라서 드로우비드에서의 마찰 하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_t = T_{f+d} - T_d \quad (1)$$

Table 1 Chemical composition of bead materials

Bead materials	Chemical composition (wt, %)				
	C	Si	Mn	P	S
FC300	2.80~3.30	1.50~2.10	0.60~1.10	Max 0.15	Max 0.15
SKD11	1.40~1.60	Max 0.40	Max 0.06	Max 0.03	Max 0.03

Table 2 Experimental condition of drawbead test

Bead material	Iron(FC300), Steel(SKD11)
Bead surface treatment	Base, Cr plating
Bead size	9.52mm × 9.52mm × 78mm (W×H×L)
Bead shape	Circular shape bead Rectangular shape bead
Sheet	CR steel sheet, GA steel sheet, EG steel sheet, Al alloy steel sheet
Specimen size	Width 45mm × Length 500mm
Clearance / Clamping depth	1.3mm / 9.52mm
Drawing Length	Roller bead 70mm / Fixed bead 70mm
Drawing speed	1000 mm/min

Table 3 Properties of lubricants used in this test

Lubricant oil No.	Type	Viscosity (40°C, cSt)	Specific gravity (15°C/4°C)
1	Washing & rust preventive oil	2.7	0.808
2	Drawing oil	3.0	0.812
3	Extreme pressure additive oil	6.5	0.840

Table 4 List of sheets used in this test

Coating type		Sheets	Thickness
CR		SPCC	0.7mm
		SPCD	0.7mm / 0.9mm
		SPCEN	0.7mm
		SPCUD	0.7mm
		SPRC35R	0.7mm
		SPRC35E	0.7mm
		TRIP60	1.0mm
GA		SGACC	1.0mm
		SGACEN	0.7mm / 1.0mm
		SGACUD	0.7mm
		SGARC35R	0.7mm
		SGARC35E	0.7mm
EG	EGF	EDZFR35	0.7mm
		EDZFCEN	0.8mm
	Organic coating	RCNCEN	0.7mm
Al		GC45	1.2mm
		GC55	1.2mm

CR : Cold Rolled

EG : Electrogalvanized Coating

GA : Hot-dip galvanized

EGF : Electrogalvanized Zn-Fe alloy

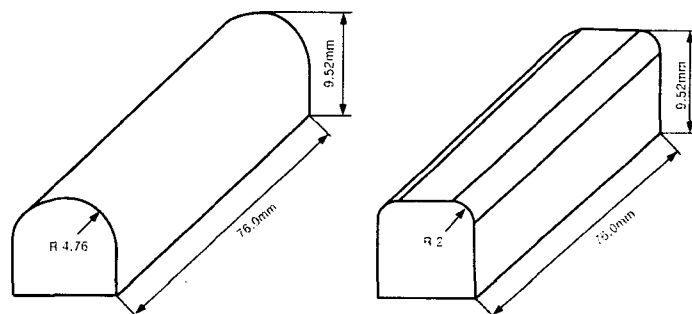


Fig. 3 Schematic view of circular bead and rectangular bead

여기서, T_t 는 드로우비드에서의 마찰하중이고, T_{fd} 는 고정비드에서의 인출력, T_d 는 롤러비드에서의 인출력이다. Fig. 5에서 보는바와 같이 비드 접촉부의 전체 마찰력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_t = l \times f \quad (2)$$

여기서, μ 는 비드 접촉부의 전체 마찰력, l 은 접촉부 길이, f 는 비드 접촉부의 스트립 단위 면적당 작용하는 마찰력(일정하다고 가정)이다.

식 (1)과 식 (2)는 동일해야 하므로,

$$T_{f+d} - T_d = l \times f \quad (3)$$

식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{T_{f+d} - T_d}{l} \quad (4)$$

또한 비드에서의 힘의 평형을 고려하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$N_{f+d} = 2rp \quad (5)$$

여기서, r 은 비드 반경이고 p 는 비드 접촉부의 스트립 단위 면적당 작용하는 수직력(일정하다고 가정), N_{f+d} 는 고정비드 사용시의 수직력(normal force)이다. 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \frac{N_{f+d}}{2r} \quad (6)$$

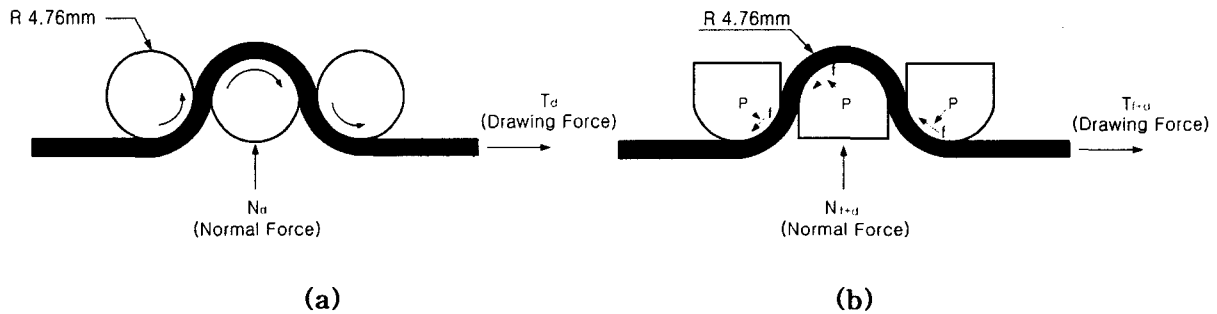


Fig. 4 Aspect touched between bead and sheet (a) roller bead (b) fixed bead

Fig. 4에서 접촉부의 총 길이를 하나의 원 둘레와 같다고 볼 수 있으므로 접촉부의 길이를 $l \approx 2\pi r$ 로 가정하고 쿨롬의 마찰법칙에 대입해보면, 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\mu = \frac{f}{p} = \frac{\frac{T_{f+d} - T_d}{l}}{\frac{N_{f+d}}{2r}} = \frac{2r(T_{f+d} - T_d)}{l \times N_{f+d}} = \frac{2r(T_{f+d} - T_d)}{2\pi r N_{f+d}} = \frac{T_{f+d} - T_d}{\pi N_{f+d}} \quad (7)$$

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5와 Fig. 6은 각 강판별로 마찰계수와 가압하중에 따른 드로잉 하중을 나타내었다. 모든 경우에 마찰계수와 가압하중에 대해 드로잉 하중이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

사각비드의 경우에는 접촉 면적이 불균일하고 원형비드에 비해 매우 큰 하중이 발생하였다. 이로 인해 데이터의 산포(scattering)가 크게 나타났으며 또한 사각비드의 경우 롤러비드와 모양이

다르기 때문에 각 강판의 정확한 변형하중을 반영할 수 없었다. 그래서 Nine에 의해 제안된 마찰 계수 식을 적용할 경우 변형하중이 과소평가 되어 마찰계수가 크게 나오는 문제점이 발생하였다. 그래서 재현성이 높고 데이터가 정확한 원형비드를 기준으로 실험을 수행한 후 원형비드의 데이터 값과 사각비드의 데이터 값을 비교하여 사각비드의 마찰경향을 분석하였으며, 사각비드의 무운 활의 경우에는 데이터의 산포가 너무 크게 발생하여 비교대상에서 제외시켰다.

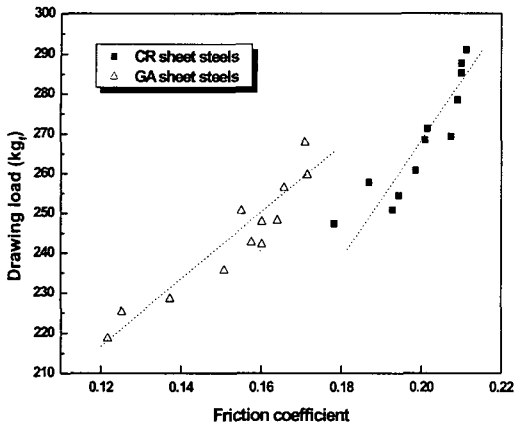


Fig. 5 Friction coefficient vs. drawing load for GA coated and cold rolled sheet steels

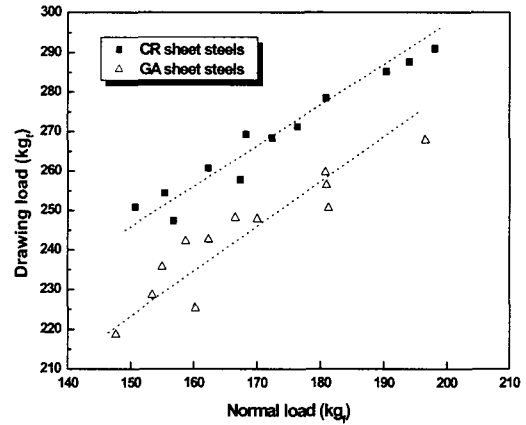


Fig. 6 Normal load vs. drawing load for GA coated and cold rolled sheet steels

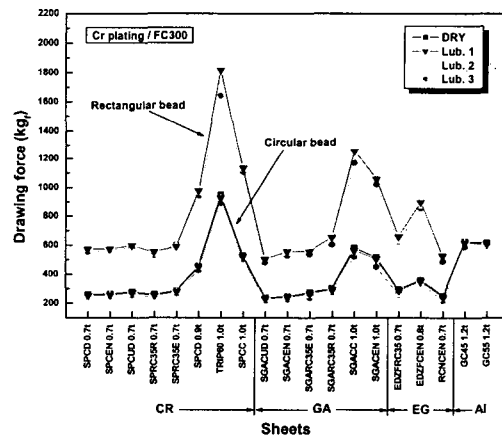
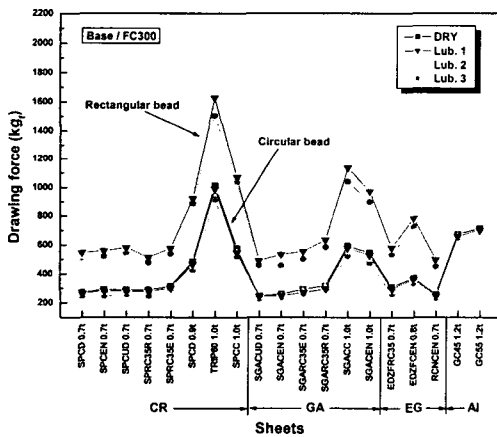


Fig. 7 Drawing force of circular and rectangular bead in various viscosity for (a) FC300 and Base, (b) FC300 and Cr plating

Fig. 7은 주철재료인 FC300의 원형비드와 사각비드의 인출력의 경향을 나타낸 그림이고, Fig. 8은 주강재료인 SKD11의 원형비드와 사각비드의 인출력의 경향을 나타낸 그림이다. 윤활유에 따라 약간의 차이는 있지만 전체적으로 원형비드와 사각비드의 인출력 경향이 일치함을 알 수 있다. 그러므로 사각비드의 경우, 각 공정인자에 따른 마찰특성이 원형비드와 같음을 유추할 수 있다. 또한 원형비드의 인출력 보다 약 1.5~2배 정도의 차이를 보이고 있어 그만큼 재료를 잡아주는 힘이 사각비드가 큼을 알 수 있다.

그리고 TRIP60과 SGACEN(1.0t), SGACC(1.0t)의 경우에 낮은 마찰계수를 가짐에도 불구하고

다른 강판에 비교하여 높은 인출력을 나타내는 것은 높은 항복응력과 재료두께 차이에 기인한 것이다.

Fig. 9와 Fig. 10은 사각비드 마찰 실험시 파단이 일어난 알루미늄(Al) 강판과 넥이 발생한 일부 합금화용용도금(GA) 강판의 사진이다. 알루미늄(Al) 강판인 GC45와 GC55의 경우, 두께와 높은 항복응력으로 인해 사각비드의 곡면을 슬립하지 못하여 과도한 마찰작용으로 시편에 넥이 발생하여 결국엔 파단이 일어났으며 모든 사각비드에서 발생하였다.

그리고 합금화용용도금(GA) 강판인 SGACEN(1.0t), SGACC(1.0t)의 경우 인출력이 증가함으로써 연질인 도금층이 드로우비드에 고착하여 슬립이 적어지고 이로 인해 과도한 마찰작용이 발생하여 넥이 발생한 것으로 사료된다. 하지만 이런 넥(neck) 현상은 전체적으로 극히 일부분에서만 발생하였다.

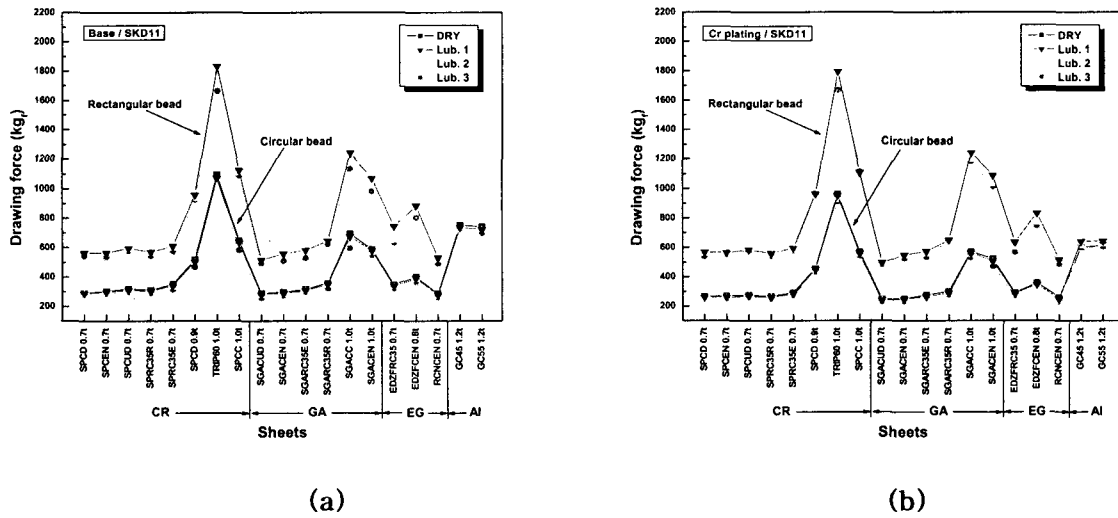


Fig. 8 Drawing force of circular and rectangular bead in various viscosity for (a) SKD11 and Base, (b) SKD11 and Cr plating

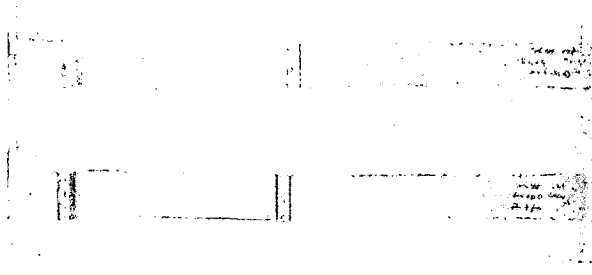


Fig. 9 Fracture view of aluminum steel sheets (GC45 1.2t, GC55 1.2t) for rectangular bead experiment

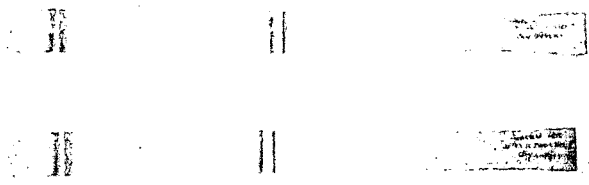


Fig. 10 Necking view of GA steel sheets (SGACEN 1.0t, SGACC 1.0t) for rectangular bead experiment

4. 결론

본 연구에서는 자동차용 판재 성형시 중요한 역할을 하는 드로우비드의 여러 공정인자들 중에서 비드 형상이 마찰계수에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 마찰계수와 가압하중에 대해 드로잉 하중은 거의 선형적인 관계에 있다.
- (2) 원형비드와 사각비드의 인출력 경향은 거의 일치하였다.
- (3) 사각비드의 인출력은 원형비드에 비해 약 1.5~2배 정도로 크게 나타났다.

참고문헌

1. H. D. Nine, Mechanics of sheet metal forming, pp. 179-211(1978)
2. M. Samuel, Journal of Materials Processing Technology, vol. 122, pp. 94-103(2002)
3. N. M. Wang, Journal of Applied Metal Working, pp. 185-192(1981)
4. J. A. Schey, Journal of Materials Processing Technology, vol. 57, pp. 146-154(1996)
5. Z. L. Zhang, L. Chen, Journal of Materials Processing Technology, vol. 63, pp. 144-147(1997)
6. L. R. Sanchez, K. J. Weinmann, 15th IDDRG, pp. 217-226(1998)