

알루미늄 판재의 성형성 향상을 위한 적외선 국부 열처리법의 곡선형태 적용에 관한 연구

이은호^{1, #} · 양동열²

A Study on the Infrared Local Heat Treatment of Curved Line for Aluminum Alloy Sheet

E. H. Lee, D. Y. Yang

(Received October 16, 2017 / Revised February 26, 2018 / Accepted February 28, 2018)

Abstract

Auto industries have tried to employ lightweight alloys to improve the fuel efficiency of manufactured vehicles, as the environmental concern becomes an important issue. Even though the aluminum alloy is one of the most appropriate lightweight alloys for auto parts, the low formability of an aluminum alloy has been an obstacle to its application. In order to resolve the low formability problem, a recent study (Lee et al., 2017 [1]) showed that the infrared (IR) local heat treatment can improve the formability with a reduction of heating energy. However, the aforementioned study was limited to only a linear line heating. Since many of the available auto parts as applicable to vehicle manufacturing have a curved line shape, the heating experiments for a curved line should be studied. The possibility of building IR lamps having complex shapes is an advantage of the IR lamp, since it can control the heating shape. This work conducted the IR local heat treatment for the curved line. The experimental results show that the IR local heat treatment can improve the formability of the aluminum alloy for curved line. Additionally, it is shown that the IR local heat treatment also reduces the heating energy when it is compared with the furnace heating which heats a blank as a whole. A numerical simulation with a stress-based forming limit diagram also supports the experimental results.

Key Words : AA5083, Formability, Infrared local heat treatment, Curved line shape, Stress-based forming limit diagram

1. 서 론

연비향상을 위해 자동차 산업계는 경량화 소재 적용을 위한 노력을 지속해 왔다. 대표적인 경량화 소재로 알루미늄 합금이 자동차 산업계에서 많이 사용되고 있지만 성형성이 낮아 응용에 한계가 있다. 알루미늄 소재의 성형성을 향상시키는 방안으로 Lee 등 [1]은 최근 적외선 국부가열을 이용한 중간

열처리(intermediate heat treatment)를 진행하여 성형성을 크게 향상시킬 수 있음을 보였다. 하지만 이 연구는 직선형태 가열만을 진행하였다는 한계가 있다. 자동차 부품의 많은 형태가 곡선을 포함하고 있기 때문에 적외선 국부 열처리를 곡선형태에 적용하는 연구가 요구된다. 본 논문에서는 AA5083 소재를 이용하여 곡선형태를 가지는 형상을 성형하는 연구를 진행하였다. 목표형상은 Fig. 1에서 확인 할

1. 한동대학교 기계제어공학부

2. 한국과학기술원 기계공학과

Corresponding Author : School of Mechanical and Control Engineering,
Handong Global University
E-mail : ehlee@handong.edu

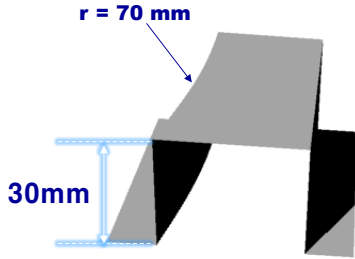


Fig. 1 Target shape with curved line

수 있으며 열처리 없이 성형 시 파단(fracture) 발생으로 성형이 불가능하다. 이를 해결하기 위해 목표형상의 일정범위까지 1차로 성형한 뒤 국부적으로 필요한 부분만을 적외선 열처리 하여 다시 최종목표형상으로 성형하는 중간 열처리 기법을 연구에 이용하였다. 실험에 앞서 유한요소법(finite element method)을 사용하여 해석을 통한 가열범위를 결정하였다. 또한 국부가열이 전체가열에 비해 에너지를 크게 절감 할 수 있음을 보였다.

2. FEM 해석

실험 소재는 AA5083 소재로 물성은 Table 1 에 정리 되어 있다. 중간 열처리 연구에 앞서 열처리가 소재의 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 2(a)는 인장실험 전에 소재를 300℃, 400℃로 가열 후 냉각한 뒤 인장실험한 결과를 원소재의 인장실험 결과와 비교하여 보여준다. 원소재의 인장강도(Ultimate tensile strength)는 300MPa인데 300℃ 열처리를 할 경우 인장강도가 290MPa 약 3% 감소, 400℃의 경우 270MPa로 약 10%정도 감소한다. 결과는 Table 2에 정리하였으며 열처리가 소재의 기계적 물성에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다. 알루미늄 소재의 유동응력과 경도는 거의 선형적 비례 관계를 보이는 것이 여러 연구를 통해 많이 알려져 있기 때문에 [2-3], 경도 역시 인장강도와 거의 동일한 수준으로 낮아지는 것을 유추 할 수 있다. Fig. 2(b)는 AA5083 소재에 중간 열처리를 적용한 인장실험 결과를 나타낸다 [1]. Fig. 2(b)의 인장실험은 먼저 15% 변형을 한 뒤에 적외선 가열 후 냉각 한 뒤 다시 파단이 발생할 때 까지 인장을 하였다. Fig. 2(b)의 원소재(As-received)는 열처리 없이 한번에 파단까지 인장을 한 시편의 데이터이고, 녹색 삼각형 데이터는 15%인장 및 300℃ 열처리 후 다시 인장실험

함을 한 결과이다. 핑크색 삼각형은 400℃ 열처리를 동일한 방법으로 한 시편의 데이터이다. 결과에서 볼 수 있듯이 1차 인장 후 300℃ 에서 열처리 시 원소재 대비 연신율(total elongation)이 크게 증가하였지만 인장강도는 거의 동일하다. 하지만 400℃로 열처리 할 시 300℃대비 연신율이 약간 더 증가하면서 인장강도는 떨어지는 것을 볼 수 있다. Table 3에 열처리 온도에 따른 중간 열처리의 연신율 결과를 정리하여 보여준다. 기계적 물성 변화 및 연신율의 증가를 좀더 자세히 분석하기 위해 electron backscatter diffraction (EBSD) system을 이용하여 조직을 분석하였고 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 조직사진 내의 빨간 점은 low angle boundary를 통해 전위 밀도를 가시적 보여준다. 원소재에서는(Fig. 3a) 전위 밀도가 낮지만 1차 성형 후에는 전위밀도가 높아진 것을 확인 할 수 있다(Fig. 3b). 하지만 열처리를 하면 다시 전위밀도가 낮아진 것을 확인 할 수 있다(Fig. 3c). 이는 1차 인장에서 증가된 전위 밀도(dislocation density)가 열처리로 인해 낮아져 다시 원상태 정도로 복귀하기 때문이다[1,4-5]. 다시 인장실험을 진행하여 파단이 발생하면 전위밀도가 다시 높아 지는 것을 확인 할 수 있다 (Fig. 3d). Fig. 3은 Fig. 2(b)의 결과를 뒷바침 해 준다. 본 연구에서는 이 원리를 이용하여 중간 열처리 방식을 이용하여 곡선형태를 가지는 Fig. 1 의 형상을 성형하는 것이 목표이며 실험에 앞서 유한요소법을 이용한 해석을 진행하여 열처리 부위를 확정하였다. 해석에 사용된 프로그램은 Formsys-3D 이며 다양한 판재성형 해석에 사용되어 검증되어 왔다 [6-8]. 유한요소 모델에는 4절점 쉘요소(4node shell element)가 사용되었으며 경화식(hardening law)은 아래와 같이 Voce 경화식이 사용 되었다.

$$\bar{\sigma} = A - B \exp(-C \bar{\epsilon}^p) \quad (1)$$

$\bar{\sigma}$, $\bar{\epsilon}^p$ 는 각각 등가응력(equivalent stress) 와 등가 소성 변형률(equivalent plastic strain)을 나타낸다. A, B, C 는 Voce 경화식의 재료 상수이며 값은 Table 4에 정리되어 있다. Fig. 4은 펀치가 목표깊이로 하강하였을 때 등가 소성 변형률의 유한요소법 해석결과를 보여준다. Fig. 4에서 확인 할 수 있듯이 바닥 곡선라인

Table 1 Properties of AA5083

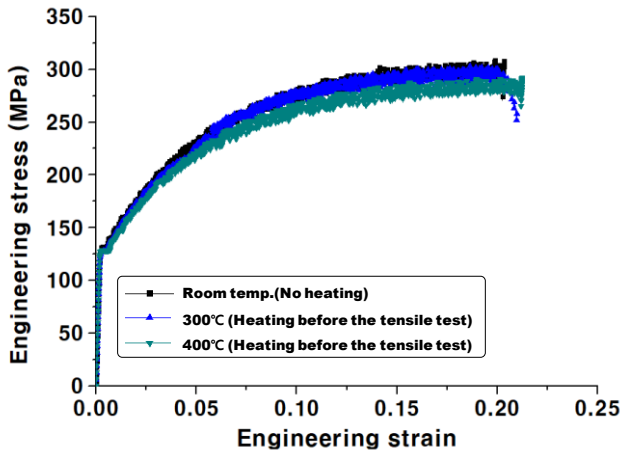
Young's modulus	Poisson's ratio	Yield stress	Normal anisotropic coefficient
71 GPa	0.3	130 MPa	0.67 (\bar{R})

Table 2 Change of mechanical properties according to temperature of the heat treatment before the tensile test

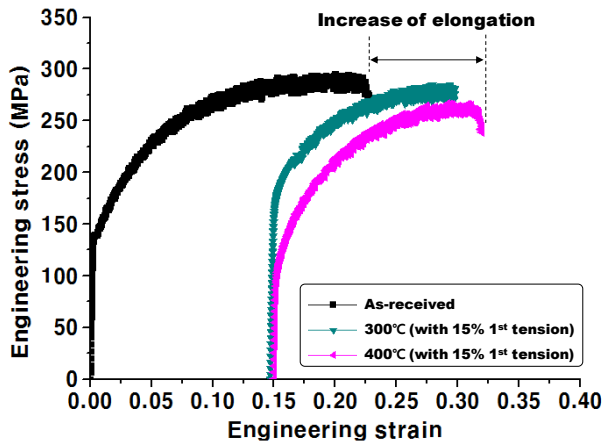
Ultimate tensile strength	As received	300°C heat treatment	400°C heat treatment
	300 MPa	290 MPa	270 MPa

Table 3 Total elongation in the intermediate heat treatment

Total Elongation	As received	300°C heat treatment	400°C heat treatment
	20.7 %	30.9 %	31.9 %



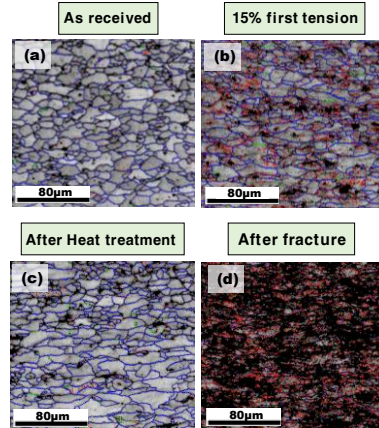
(a) Heat treatment before the tensile test



(b) Intermediate heat treatment for AA5083

Fig. 2 Effect of heat treatment on the mechanical property

의 위쪽 (그림의 파란색 원 내부) 에서 소성변형이 가장 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 좀 더 정밀한 분석을 위하여 성형 한계도(forming limit diagram)를 이용하여 분석을 하였다. 본 연구에서는 응력기반 성형 한계도(stress-based forming limit



(a) As-received (b) After 1st tension (c) After heat treatment (d) After fracture

Fig. 3 Microstructure of AA5083

diagram)를 사용하였다. 응력기반 성형 한계도의 경우 변형률기반 성형 한계도(strain-based forming limit diagram)와는 다르게 변형경로(strain path)에 영향을 받지 않아 성형 한계도가 변형경로와 관계없이 일정한 형태를 유지한다 [9-11]. 응력기반 성형 한계도는 전통적인 변형률기반 성형 한계도 데이터를 이용하여 쉽게 변환해서 얻을 수 있다 [11-12]. 또한 상수 등가 소성 변형률법(constant EPS method)를 함께 이용할 경우 열처리효과를 간단하게 고려함과 동시에 온도조건에 상관없이 응력기반 성형 한계도가 독립적으로 일정한 형태를 유지 할 수 있는 장점이 있어 여러 연구에서 사용되었다[1,12]. 이에 본 연구에서는 응력기반 성형 한계도와 상수 등가 소

성 변형률법을 결합하여 사용하여 해석을 하였고 두 방법에 대한 자세한 내용은 인용된 논문에서 자세히 정리되어 있다[1,12]. Fig. 5는 AA5083의 응력기반 성형 한계도와 성형된 목표형상의 유한요소법 해석 상 주응력(principal stress) 분포를 보여준다. AA5083의 응력기반 성형 한계도상에 가까이 걸쳐있는 group A 부위가 파단 발생 할 확률이 가장 높은 부위이며 이 group A는 Fig. 4에서 가장 높은 등가 소성 변형률 지역(Fig. 4의 파란색 원 내부)과 일치한다. 따라서 본 연구의 실험에서는 group A를 지나는 바닥 곡선라인만을 열처리 하기로 결정하였다.

Table 4. Voce hardening parameters of AA5083

A (MPa)	B (MPa)	C
359.8	226.1	14.0

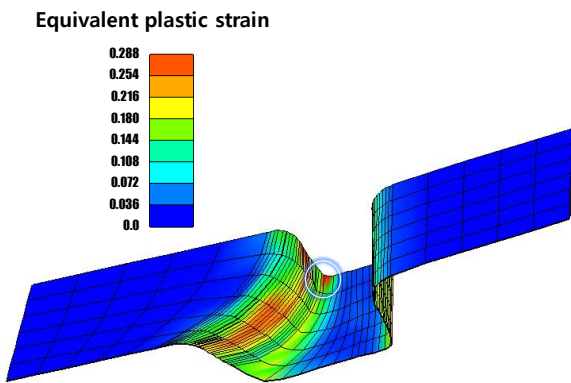


Fig. 4 Simulation result

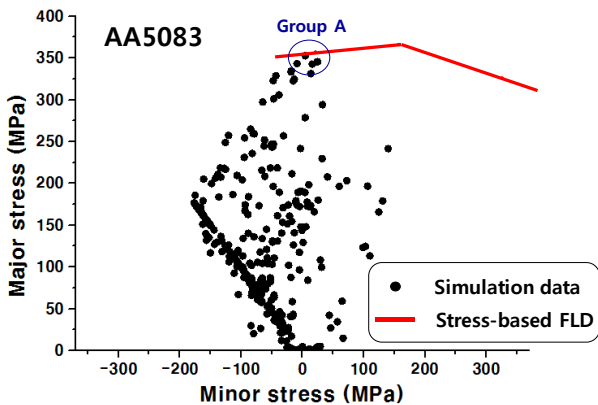
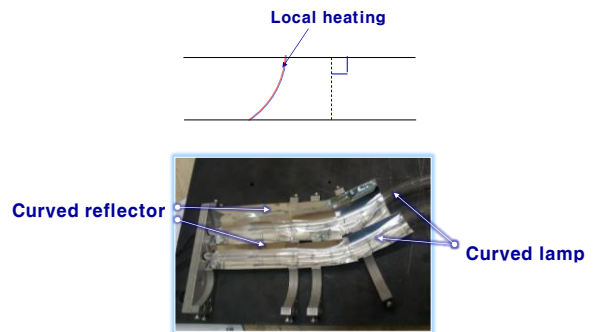


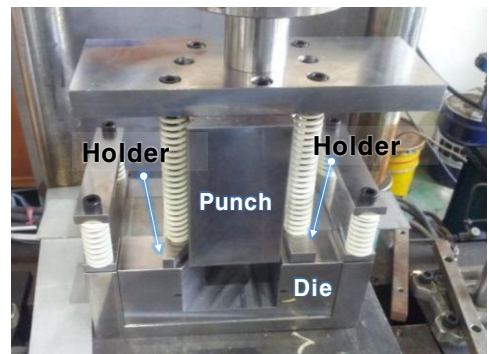
Fig. 5 Stress-based FLD data without heat treatment

3. 적외선 국부열처리 실험

Fig. 6(a)는 곡선부위 가열을 위한 곡선형 가열장치 모습을 보여주며 Fig. 6(b)는 실험을 위한 금형세팅을 나타낸다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 곡선형 가열램프를 바닥부의 곡선라인의 형상을 따라 제작을 하여 열처리 하였다. 원하는 형상대로 램프를 제작하여 가열형태를 조절 할 수 있는 점은 적외선 가열의 큰 장점이다. 펀치의 목표하강 깊이는 총 30mm이다. 실험은 두가지 case로 진행하였다. Case 1은 열처리 없이 30mm 성형을 하는 실험이고, Case 2는 1차성형으로 20mm까지 성형을 진행 한 뒤 열처리 이후에 다시 30mm까지 성형을 진행하는 실험이다. 열처리 온도는 Fig. 2(b)에서 확인 할 수 있듯이 상온대비 연신율이 크게 증가하는 동시에 기계적 물성은 큰 변화가 없는 300℃로 결정하였다. Fig. 7는 Case 1, 2의 실험결과를 보여준다. 열처리 없이 진행된 Case 1의 경우 바닥 곡선부위에서 파단이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 적외선 국부 열처리를 이용한 Case 2의 경우 파단 없이 성공적으로 성형을 할 수 있었다.



(a) Curved heating lamp



(b) Die setting

Fig. 6 Experimental setting

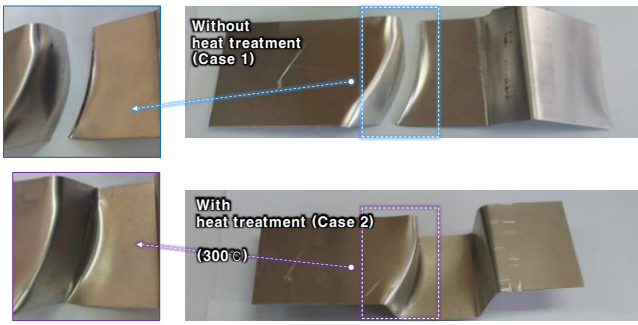


Fig. 7 Experimental results

4. 논의

Fig. 7에 나타나 있는 실험 결과는 Fig. 4과 Fig. 5의 해설결과와 같은 경향을 보여준다. 그리고 적외선 국부 열처리법이 곡선형태를 가지는 형상에도 적용되어 성형성을 향상 시킬 수 있는 것을 보여준다. 열처리에 대한 영향을 좀더 분석하기 위해 응력기반 성형 한계도와 상수 등가 소성 변형률법([1,12] 참조)을 이용하여 유한요소 해석을 진행하였다. Fig. 8은 적외선 국부 열처리를 사용하여 중간 열처리를 진행한 Case 2의 유한요소 해석을 보여준다. 주응력 분포를 AA5083의 응력기반 성형 한계도 상에 나타내었다. Fig. 5와 비교하여 보면 알 수 있듯이 열처리를 한 경우 주응력 분포가 확연히 낮아져 group A (바닥 부 곡선위쪽)의 결과도 확실하게 응력기반 성형 한계도의 아래쪽에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 실험결과를 뒷받침 하는 결과이다. 또한 추가적으로 국부 열처리에 의한 가열 에너지 절감 정도를 전체가열 대비 분석하였다. 전체가열과 국부 가열의 에너지 비율은 아래의 수식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta E_{local}}{\Delta E_{whole}} = \frac{C_p(\rho A_{local} t)\Delta T}{C_p(\rho A_{whole} t)\Delta T} = \frac{A_{local}}{A_{whole}} \quad (2)$$

ΔE 은 가열에너지를 나타내며 아래첨자 whole은 전체가열을 local은 국부가열을 나타낸다. C_p 은 비열을, ρ 은 밀도를, A 은 가열 넓이를, t 는 판재의 두께를, 그리고 ΔT 은 상승온도를 나타낸다. 수식(2)와 같이 전체가열과 국부가열이 동일한 재료를 동

일한 목표온도로 가열한다는 가정하에 가열 넓이의 비율로 비교를 할 수 있다. 본 연구의 사용된 판재의 넓이는 15600mm^2 이고, 국부가열 넓이는 약 4400mm^2 이다. 따라서 국부가열의 에너지 비율은 전체가열 대비 약 28% 이다. 따라서 국부가열로 약 72% 가열에너지를 절감할 수 있음을 알 수 있다.

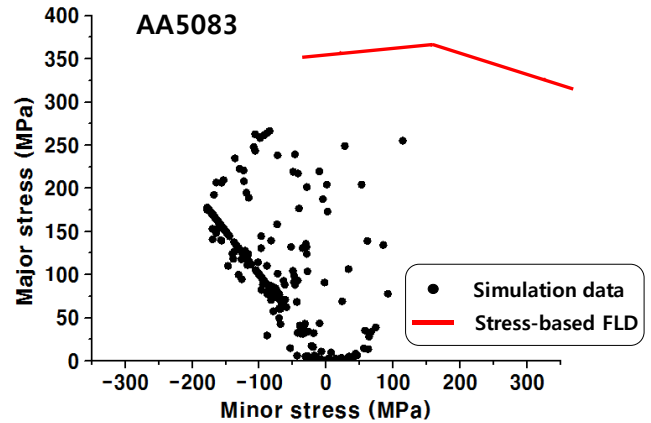


Fig. 8 Stress-based FLD data with heat treatment

5. 결론

곡선형태를 포함하는 형상을 AA5083 소재로 제작하기 위하여 곡선라인에 적외선 국부 열처리를 적용하였다. 연구내용 정리는 아래와 같다.

- (1) 적외선 국부가열을 사용하여 중간 열처리를 할 경우 알루미늄 소재의 성형성을 향상 시킬 수 있으며 본 연구에서는 곡선형태로 가열램프를 제작하여 목표형상의 곡선라인에 맞추어 제작해 열처리하였다.
- (2) 소성변형이 집중되는 곡선라인만을 적외선 국부 가열법을 이용하여 중간 열처리 하였을 경우 AA5083 소재의 성형성을 향상시켜 목표형상으로 성형을 할 수 있었으며 응력기반 성형 한계도 해석에서 동일한 결과를 얻을 수 있다.
- (3) 적외선 국부 열처리가 전체열처리에 비해 70%정도의 가열에너지 절감 효과를 얻을 수 있었다.

REFERENCES

- [1] E. H. Lee, D. Y. Yang, S. J. Ko, 2017, A study on infrared local heat treatment for AA5083 to improve formability and automotive part forming, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 26, pp. 5056-5063.
- [2] M. Tiryakioğlu, J. S. Robinson, M. A. Salazar-Guapuriche, Y. Y. Zhao, P. D. Eason, 2015, Hardness–strength relationships in the aluminum alloy 7010, *Mater. Sci. Eng.: A*, Vol. 631, pp. 196-200.
- [3] P. A. Stathers, A. K. Hellier, R. P. Harrison, M. I. Ripley, J. Norrish, 2014, Hardness–Tensile Property Relationships for HAZ in 6061-T651 Aluminum, *Welding Journal*, Vol. 93, pp. 301-311
- [4] S. Golovashchenko, A. Krause, 2005, Improvement of formability of 6xxx aluminum alloys using incremental forming technology, *J. Mater. Eng. Perform.*, Vol. 14, pp. 503-507.
- [5] M. Verdier, M. Janacek, Y. Bréchet, and P. Guyot, 1998, Microstructural evolution during recovery in Al–2.5%Mg alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 248, pp. 187-197.
- [6] T. J. Kim, D. Y. Yang, 2007, FE-analysis of sheet metal forming processes using continuous contact treatment. *Int. J. Plast.*, Vol. 23, pp. 544–560.
- [7] J. B. Kim, J. W. Yoon, D. Y. Yang, 2000, Wrinkling initiation and growth in modified Yoshida buckling test: finite element analysis and experimental comparison. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 42, pp. 1683–1714.
- [8] E. H. Lee, D. Y. Yang, J. W. Yoon, W. H. Yang, 2015, Numerical modeling and analysis for forming process of dual-phase 980 steel exposed to infrared local heating, *Int. J. Solids. Struct.*, Vol. 75-76, pp. 211–224.
- [9] H. J. Kleemola, M. T. Pelkkikangas, 1977, Effect of predeformation and strain path on the forming limits of steel, copper and brass. *Sheet. Met. Ind.*, Vol. 64, pp. 591-592
- [10] R. Arrieux, C. Bedrin, M. Boivin, 1982, Determination of an intrinsic forming limit stress diagram for isotropic sheets. In *Proceedings of the 12th IDDRG Congress*, Vol. 2, pp. 61-71
- [11] T.B. Stoughton, 2000, A general forming limit criterion for sheet metal forming. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 42, pp. 1-27.
- [12] J. Li, J. E. Carsley, T. B. Stoughton, L. G. Hector, S. J. Hu, 2013, Forming limit analysis for two-stage forming of 5182-O aluminum sheet with intermediate annealing, *Int. J. Plast.*, Vol. 45, pp. 21-43.