

## 2층 클래드 강재의 유한요소해석을 이용한 이방성지수 계산

김정기<sup>1</sup> · 박병호<sup>1</sup> · 김성규<sup>2</sup> · 진광근<sup>2</sup> · 김형섭<sup>#</sup>

### Finite Element Analysis of the R-value of a 2-Layer Clad Steel

J. G. Kim, B. H. Park, S. K. Kim, K. G. Chin, H. S. Kim

(Received May 9, 2014 / Revised July 2, 2014 / Accepted July 8, 2014)

#### Abstract

In the current study, the R-value behavior of a two-layer clad steel was investigated using finite element analysis. Hill's 1948 anisotropic yield equation was employed to characterize the anisotropic behavior of the steel with different assumed properties: isotropic (R=1) and anisotropic (R=2). Experimental R-values were determined by measuring the width and thickness ratios of tensile specimens. Finite element analysis results demonstrate a difference in strain behavior in the width and the thickness directions of the clad steel. The R-value behavior depends on the fraction of the clad materials and total elongation.

**Key Words:** Clad Metal, Formability, R-value, Finite Element Analysis

#### 1. 서론

한가지 재료로 원하는 복합적인 물성을 얻기 어려울 때에 복합재료를 이용하여 다기능성 재료로 제조하면 산업적으로 매우 유용하다. 클래드 적층재는 특성이 다른 이종의 판상 재료를 접합하여 목표하는 다기능성 특성을 얻는 복합판재료로서, 기계적, 열적 특성 및 전기적 특성을 향상시키는 효과를 가져왔다. 비철금속에서뿐 아니라 철강 재료 또한 이러한 클래드재로 사용되어 왔으며, 저탄소강과 타이타늄을 결합하여 강도와 내식성을 동시에 향상시키는 등 다양한 연구 사례가 학계와 산업계에 보고되고 있다. 최근에는 재료의 성형성 향상을 위하여 성형성이 다른 재료를 이용한 클래드재의 제작 사례 역시 보고되고 있다[1~3].

이들 클래드재의 특성분석 방법은 다양해지고 있는 추세로 인장 변형에서의 전위밀도의 변화 및 내부 격자 변형의 변화를 측정하기 위해 X-선 싱크로

트론을 이용하거나 중성자 빔을 이용하는 연구 결과가 최근에 보고되고 있으며[4], 클래드재 사이의 접합력의 분석을 위해 굽힘 시험이나 필링 시험 등이 많이 시행되고 있다.

클래드재의 성형성 평가방법은 가장 기본적인 인장시험을 비롯하여 기존의 금속 판재의 성형성 평가와 유사하게 Erichsen 시험법, 컵 드로잉 시험법, R-value 측정법 등으로 이루어질 수 있다. 이 중에서 R-value 측정은 일반적인 판재의 인장시험을 통하여 간단하게 진행될 수 있으므로 학계와 산업계에서 모두 유용하게 사용이 가능하다. 이론적으로는 R-value가 증가할수록 성형 시 판재의 두께 감소가 용이하지 않게 되면서 한계드로잉비가 증가하게 되므로 판재성형성이 향상된다[5].

클래드재의 성형성 분석에 대한 연구는 이종의 재료를 결합하였을 때의 각 재료의 변형거동을 보여줄 뿐만 아니라 복합판재의 소성가공한계 시점을 확인할 수 있다는 점에 있어서 중요하다. 그러나 재료의

1. 포항공과대학교 신소재공학과

2. ㈜ 포스코

# Corresponding Author : Department of Material Science and Engineering, POSTECH, E-mail: hskim@postech.ac.kr

이방성뿐 아니라 가공경화거동까지 복합적으로 고려하게 될 경우 재료간의 기계적 특성 차이에 의한 변형거동 차이가 발생하게 되며 이는 순수하게 이방성에 의해 나타나는 효과를 확인하는데 있어서 문제점으로 작용하게 된다.

따라서 이러한 효과를 제외하고 순수한 이방성에 의한 효과를 확인하기 위해서는, 강도, 가공경화능, 변형률속도민감도 등 다른 요소를 배제하고 이방성만 다른 두 재료간의 비교를 통하여 고찰할 수 있으며 이는 유한요소해석을 통해 구현이 가능하다.

본 연구에서는 동일한 강도 및 가공경화능을 가지면서 서로 다른 이방성을 가지고 있는 2층 클래드 강재의 인장 유한요소해석 시 R-value의 변화를 확인하고자 한다. 유한요소해석에서는 신뢰성을 확보하기 위하여 단일 이방성 재료의 R-value를 전산 모사를 통하여 1차적으로 검증한 후, 해당 재료가 2층 클래드 강재로 구성되었을 때의 각 판재의 두께 분율 및 소성변형률에 따른 R-value의 변화를 2차적으로 해석하고 고찰하고자 하였다.

## 2. 유한요소해석

본 논문에서 연구한 복합판재 인장거동의 유한요소해석은 ABAQUS-6.9EF2 standard 탄소성 상용프로그램을 이용하여 진행하였다. 판재 물성의 이방성을 고려하기 위한 항복식으로서 Hill 1948 모델을 사용하였다[6]. 유한요소해석에 사용된 재료의 응력-변형률 물성은 Fig. 1과 같은 저탄소강 응력-변형률 그래프에 R-value를 각각 가상으로 1 (등방성), 2 (이방성)의 값을 주어 서로 다른 이방성을 가지도록 설정한 재료 모델을 사용하였다.

ABAQUS에서는 Hill 1948 모델을 기반으로 한 포텐셜을 기입하게 되어 있으며, 이는 압연 방향에서의 r-value를 Hill 1948 모델로 변환하여 각 방향에서의 비등방성 값을 정의한 것이다. 본 논문에서는 수평 비등방성을 가정하여 수식 (1)을 이용해 재료의 포텐셜을 계산하였다[7]. 이때, 수식 (1)을 이용해 계산한 등방성 재료와 이방성 재료에서의 포텐셜 값은 Table 1과 같다.

$$R_{11} = R_{22} = 1 \quad R_{33} = \sqrt{\frac{R+1}{2}} \quad (1)$$

Table 1 Potential value for imaginary steel

	R11	R22	R33
Isotropic	1	1	1
Anisotropic	1	1	1.2247

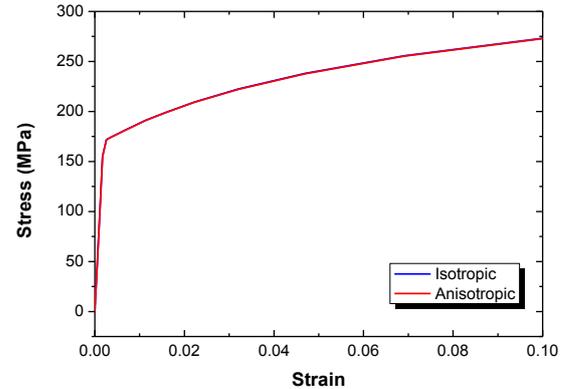


Fig. 1 Stress-strain curve of isotropic / anisotropic imaginary steel

이후 각 판 해당 재료의 기계적 특성을 가로 3mm, 세로 1.5mm, Gauge length 20mm를 가지는 인장시편에 2층 클래드 강재의 기계적 특성치로 첨가하였다.

일정한 변형 속도  $0.001 \text{ s}^{-1}$ 로 인장시험을 실시하는 것을 해석하였다. 소성변형이 일어난 클래드 강재의 폭 방향 변형률과 두께 방향 변형률을 각각 계산하여 수식 (2)의 R-value 계산식을 이용하여 R-value를 이론적으로 도출하게 된다[8~10].

$$R \text{ value} = \frac{\text{폭 방향 변형률}}{\text{두께 방향 변형률}} \quad (2)$$

이때 클래드 강재의 경우 소성변형률 차이에 의한 휘어짐 현상이 나타날 수 있으므로 이를 보정해줄 필요가 있으며 이는 인장시편 내에서의 평균 폭 방향 변형률과 평균 두께 방향 변형률을 얻어내어 수식 (2)에 동일하게 대입을 하게 될 경우 획득할 수 있다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 유한요소해석 검증

Fig. 2는 등방성 재료(R=1)와 이방성 재료(R=2)의 특성을 가지는 가상 강재의 인장변형 시 유한요소해석 결과인 인장변형률에 따른 R-value의 변화를

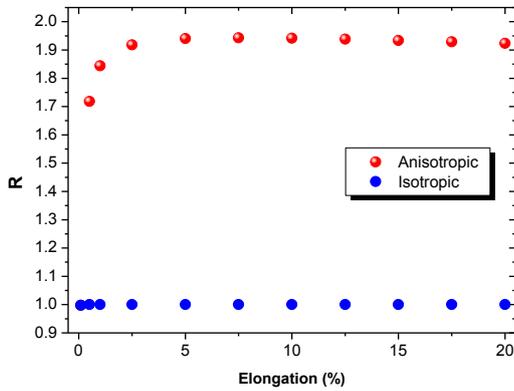


Fig. 2 R-value/elongation relation in tensile simulation result (Red: anisotropic, Blue: isotropic)

나타낸 그래프이다. 우선 등방성을 가지는 가상의 강재는 인장변형률이 증가함에 있어서도 R-value가 1을 유지함을 확인할 수 있으며, 이는 등방성을 가지는 재료에서 나타나는 일정한 R=1의 경향성과 잘 일치함을 보인다.

반면, 이방성을 가지는 강재의 경우, 초기 변형률 5%까지의 인장이 이루어지는 단계까지는 최대 R=1.94까지 R-value의 급격한 증가가 일어나게 되고, 이후 변형이 계속 일어나면서는 R=1.92까지 R-value의 감소가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 초기 첨가한 R=2와는 약 3%정도의 오차를 보이는 값으로 유한요소해석 시 나타날 수 있는 수치적 오차로 추측이 된다.

또한, Fig. 2에서는 인장변형 시험이 계속 진행됨에 따라 R-value가 약간씩 감소하는 현상이 관찰되는데 이는 수치해석에서 나타나는 오차로 0.02 정도의 차이가 나타나는 것이 확인되었다. 따라서, 위 유한요소 해석을 통하여 등방성 혹은 이방성을 가지는 가상의 재료의 R-value를 재현할 수 있음을 검증할 수 있었으며, 주어진 입력값 (R = 1, 2)과의 차이값은 오차범위 내에 있음을 알 수 있다.

### 3.2 클래드 강재의 R-value

Fig. 3은 각 강재의 인장시험 모사 유한요소해석 시 10% 인장변형률의 유한요소해석 후 두께 방향으로의 소성변형률의 분포를 보여주고 있다. 단일판재인 Fig. 3(a), 3(b)에서는 시편 내의 변형률 차이가 별로 없는 균일변형임을 알 수 있다. Fig. 4는 동일한 인장률에서의 폭 방향으로의 유효소성변형률을 보

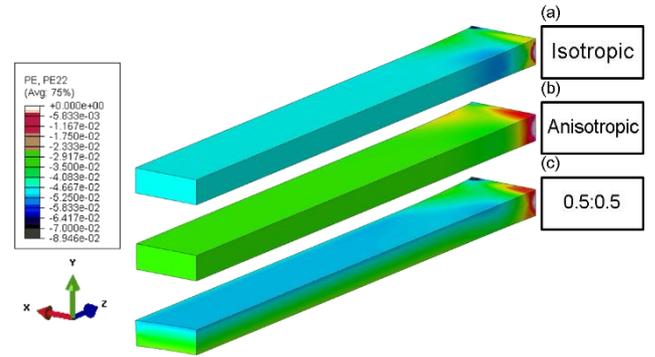


Fig. 3 3-D contour image of the thickness strain distribution (a) isotropic, (b) anisotropic, and (c) 0.5:0.5 clad after 10% tensile elongation

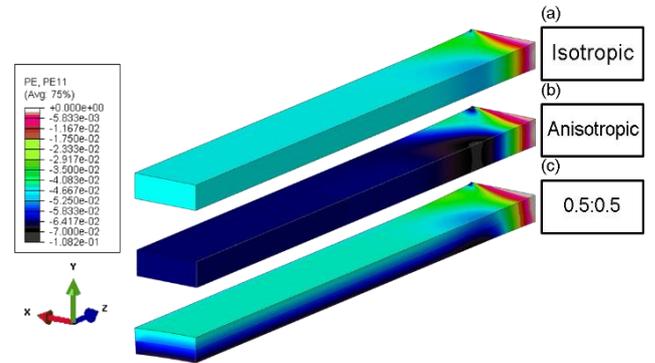


Fig. 4 3-D contour image of the width strain distribution (a) isotropic, (b) anisotropic, and (c) 0.5:0.5 clad after 10% tensile elongation

여주고 있다. Fig. 3(a), 4(a)의 결과 그림은 등방성을 가진 강재의 두께 방향과 폭 방향 소성변형률을 보여주며, 두께 및 폭 방향에서 동일한 소성변형률을 가짐을 확인할 수 있다.

반면 Fig. 3(b), 4(b)의 이방성을 가진 가상의 강재에서는 두께 방향과 폭 방향의 소성변형률이 다를 것을 보아 이방성이 확실히 나타나는 것을 알 수 있다. 이때 폭 방향의 변형률은 등방성을 가진 가상의 강재보다 큰 값을 가지고 있으나 두께 방향의 변형률은 더 작은 값을 가지고 있음을 보인다. 수식 (2)의 R-value 관계에 의하여 계산이 이루어질 경우 등방성 강재와 비교해 더 높은 R-value를 가질 것으로 예측이 된다.

Fig. 3(c), 4(c)의 두께비 0.5:0.5 클래드 강재는 인장변형이 주어짐에 따라 등방성과 이방성판재 부분에서 폭 방향과 두께 방향 모두에서 소성변형률의

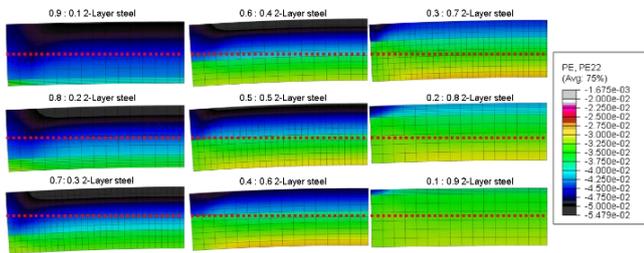


Fig. 5 2-D contour image of the thickness strain distribution as the different 'isotropic : anisotropic' material fraction(10% tensile elongation)

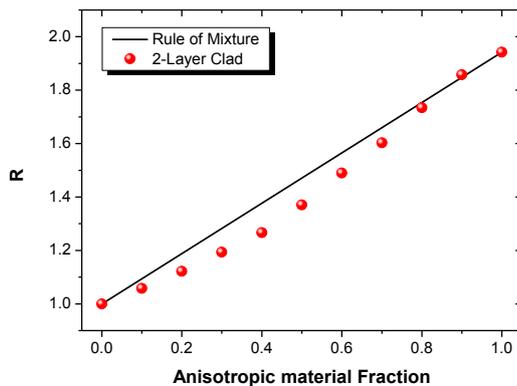


Fig. 6 Plots of R-value increases with anisotropic material fraction

차이가 나타남을 보인다. 이 소성변형률 차이에 의하여 변형의 불균일 정도가 증가하기 때문에 판재의 휘어짐 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다 [11]. 이러한 휘어짐 현상은 강재의 비율에 따라 그 정도가 바뀔 것으로 예상이 되며 Fig. 5에서는 이를 확인하기 위한 유한요소해석 결과를 보여주고 있다.

Fig. 5는 등방성 및 이방성 가상 재료로 구성된 클래드 강재를 10% 인장변형률을 가질 때의 인장 유한요소해석 시 단면에서의 두께 방향 소성변형률을 나타낸 것이다. 단면에서의 두께 감소율은 이방성 재료일 때 등방성 재료보다 더 작은 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 Fig. 3의 결과가 잘 반영되어 있음을 확인할 수 있다. 또한 인장변형이 일어남에 따라 단면에서의 휘어짐 현상이 관찰되는 것을 확인할 수 있는데, 0.5:0.5 클래드 강재에서 인장변형에 의한 휘어짐 현상이 가장 크게 나타나게 되며 등방성 혹은 비등방성 강재의 비율이 한쪽으로 크게 증가하게 되는 경우 단면에서의 휘어짐 현상이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 휘어짐 현상이

심해질수록 재료의 이방성과는 무관한 변형이 고려되었을 가능성이 높으므로 클래드 강재에서의 이론적인 경향성을 벗어날 것으로 예상이 된다.

Fig. 6은, Fig. 5에서의 계산 결과를 기반으로, 식 (2)을 이용해 계산한 2층 클래드 강재에서의 R-value를 나타낸 그래프이다. 비등방성 강재 비율이 증가할수록 클래드 강재의 유효 R-value가 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 그래프에서 클래드 강재의 R-value는 혼합법칙(rule of mixtures)을 벗어나 상대적으로 낮은 R-value를 가지고 있는데, 등방성:이방성 재료의 비율이 0.5:0.5에 가까워질수록 혼합법칙을 크게 벗어나는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 5에서도 언급하였듯이 인장변형이 일어나면서 클래드 강재의 휘어짐 현상이 발생하기 때문이며, 이로 인해 폭 방향 및 두께 방향의 변형률 간의 비율인 R-value가 실제보다 낮은 비율로 계산이 되기 때문이다. 두께 비율 0.5:0.5 클래드 강재가 가장 크게 휘어짐 현상이 나타나게 되므로, 이 비율에 가까워질수록 혼합법칙으로부터 크게 벗어나는 거동이 발생하게 되는 것이다.

Fig. 7은 2층 클래드 강재에서의 등방성:이방성 재료의 비율 및 인장변형률에 따른 R-value의 변화를 나타낸 그래프이다. 클래드 강재에서는 인장변형률이 증가함에 따라 R-value는 증가하다가 어느 시점부터 감소가 일어나는 것을 볼 수 있다. 또한 등방성:이방성 재료 비율에 따른 R-value의 변화를 보게 될 경우 초기 적은 이방성 강재를 가지고 있을 때는 그 증가폭이 혼합법칙에 의한 계산치 보다 낮은 값을 가지고 있다가 이방성 재료의 비율이 증가함에 따라 증가폭이 커지는 것을 확인할 수 있다.

또한 클래드 강재에서는 인장변형률이 증가함에 따라 R-value가 감소하는 현상이 관찰이 된다. 이는 Fig. 5에서 보여주었듯이, 클래드 판재에 인장이 일어날 경우 해당 단면 내에서의 변형률 차이에 의해 휘어짐 현상이 발생하였기 때문이며, 특히 0.5:0.5 클래드 강재에서 인장률이 증가함에 따른 R-value의 감소가 가장 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 5에서의 인장변형이 일어난 클래드 강재의 단면에서의 변형된 형상에서도 알 수 있듯이, 강재의 휘어짐 현상이 가장 심한 것에서 기인된다. 또한 인장률이 증가할수록 클래드 강재의 휘어짐이 증가하게 되므로 R-value의 감소를 유발하게 되는 것이다. 따라서, 어느 인장변형률 시점에서 R-value를 측

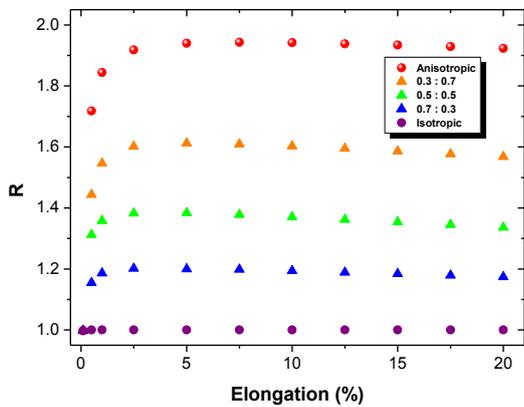


Fig. 7 R-value / elongation relation as the different isotropic / anisotropic fraction

정하냐에 따라 그 값에 차이가 있을 수 있으며 인장시험에서의 측정 시점에 따른 R-value의 변화에 대해 연구한 논문이 있다[12]. 해당 논문의 결과를 볼 경우, 초기 5%의 변형률까지는 R-value의 instability가 존재하게 되고 이후에는 일정한 변형률을 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 일정한 값이 유지되고 있는 10%내외의 변형률에서의 R-value가 가장 타당한 값을 가진다고 해석할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 동일한 강도 및 가공경화능을 가지면서 서로 다른 가상의 이방성 지수를 가지는 2층 클래드 강재에서의 인장 변형에 따른 R-value의 변화를 각 강재의 분율 및 소성인장률에 따라 분석을 하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유한요소해석을 통한 등방성 및 이방성 재료의 인장 시험 결과 최대 3%의 오차를 가지고 있으며 인장률이 증가할수록 약간의 감소하는 추세가 있음을 확인할 수 있으며 이는 수치해석에서 나타나는 오차로 확인되었다.

(2) 2층 클래드 강재에서는 등방성 및 이방성 재료의 변형률 차이에 의해 휘어짐 현상이 발생하게 되고 휘어짐 정도는 구성되는 등방성 및 이방성 강재의 비율에 따라 차이가 있음을 알 수 있으며, 강재의 비율이 동등해질수록 휘어짐 정도는 증가하게 된다.

(3) 등방성 및 이방성 강재의 비율에 따라 R-value의 변화가 나타나게 되며 이 변화는 혼합법칙과 근사하게 수렴하나, 이보다는 아래의 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 이는 강재의 비율이 변함에 따라 재료 끝 부분의 두께 방향의 변형이 증가되어 실제보다 과장된 값을 주기 때문이다.

#### 후 기

본 연구는 2014년 (주)포스코의 연구비 지원 및 시편 제공에 의해 수행되었고 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### REFERENCES

- [1] D. Embury, O. Bouaziz, 2010, Steel-based Composites: Driving Forces and Classifications, *Annu. Rev. Mater. Res.*, Vol. 40, pp. 213~241.
- [2] T. Mori, S. Kurimoto, 1996, Press-formability of Stainless Steel and Aluminum Clad Sheet, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 56, No. 1, pp. 242~253.
- [3] K. Raghukandan, K. Hokamoto, P. Manikandan, 2004, Optimization of Process Parameters in Explosive Cladding of Mild Steel and Aluminum, *Met. Mater. Inter.*, Vol. 10, No. 2, pp. 193~197.
- [4] M. Ojima, J. Inoue, S. Nambu, P. Xu, K. Akita, H. Suzuki, T. Koseki, 2012, Stress Partitioning Behavior of Multilayered Steels during Tensile Deformation Measured by in Situ Neutron Diffraction, *Scr. Mater.*, Vol. 66, No. 3, pp. 139~142.
- [5] B. Banabic, H.-J. Bunge, K. Pohlandt, A. E. Tekkaya, 2000, Formability of Metallic Materials(eds. B. Banabic), Springer, New York, p. 35.
- [6] R. Hill, 1948, A Theory of the Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals, *Proc. Roy. Soc. London Ser. A*, Vol. 193, pp. 281~297.
- [7] Dassault Systems, 2012, ABAQUS Online Documentation: Abaqus Analysis User's Manual.
- [8] W. T. Lankford, S. C. Snyder, J. A. Bauscher, 1950, New Criteria for Predicting the Press Performance of Deep Drawing Sheets, *Trans. ASM*, Vol. 42, pp. 1197~1205.
- [9] A. Chamanfar, R. Mahmudi, 2006, Effect of Specimen

- Geometry, Gage Length, and Width Measurement Locations on Plastic Strain Ratio(R-value) in Sheet Metals, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 37, No. 12, pp. 3477~3487.
- [10] T. Sun, J. Liang, X. Guo, L. Li, 2013, Tensile Anisotropy of Cu/Al Clad Metals After Prestrain using Digital Image Correlation, J. Mater. Eng. Perform., Vol. 22, No. 12, pp. 3825~3833.
- [11] S.-H. Choi, K.-H Kim, K.H. Oh, D.N. Lee, 1997, Tensile Deformation Behavior of Stainless Steel Clad Aluminum Bilayer Sheet, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 222, No. 2, pp. 158~165.
- [12] S. Aleksandrovic, M. Stefanovic, D. Adamovic, V. Lazic, 2009, Variation of Normal Anisotropy Ratio “r” during Plastic Forming, Strojniški vestnik, Vol. 55, No. 6, pp. 392~399.