

## 스테인리스 강 클래드 알루미늄 판재의 일축인장시 변형거동

최시훈, 김근환, 오규환, 이동녕  
서울대학교 금속공학과

### DEFORMATION BEHAVIOR OF STAINLESS STEEL-CLAD ALUMINUM SHEET METALS UNDER UNIAXIAL TENSION

Shi-Hoon Choi, Keun Hwan Kim, Kyu Hwan Oh and Dong Nyung Lee  
Dept. of Metallurgical Engineering and Center for Advanced Materials Research,  
Seoul National University

#### ABSTRACT

The deformation behavior of stainless steel-clad aluminum sheet metals under uniaxial tension has been investigated. The differences in mechanical properties such as elastic modulus, flow stress and plastic strain ratio, of component layers of the composite sheet gave rise to warping of the tensile specimens. The warping has been analyzed by FEM and the total force and momentum equilibria.

The analyzed radii of curvature of the warped specimens were smaller than the measured data possibly due to elastic recovery during unloading. The differences in mechanical properties may also give rise to transverse stresses in the component layers. The transverse stresses have been analyzed on the assumption of isostrain and by the FEM in which the warping has been taken into account. The transverse stresses calculated by the FEM were lower than those by the isostrain hypothesis due to stress relaxation by the warping and turned out to be negligible compared with the longitudinal stresses. Consequently, the flow stresses of the composite sheets follow the rule of mixtures.

#### 1. 서론

스테인리스 강/알루미늄 클래드 금속은 스테인리스 강의 매우 우수한 내식성 및 기계적 성질 그리고 알루미늄의 뛰어난 열 및 전기전도도를 가지고 있다. 샌드위치 판재(스테인리스 강/알루미늄/스테인리스 강)의 유동 응력은 아래와 같은 혼합 법칙을 따른다고 알려져 있다[1].

$$\sigma_{us} = \sigma_{uA} V_A + \sigma_{uB} V_B \quad (1)$$

여기서  $\sigma_u$  와  $V$ 는 일축 유동 응력과 부피 분율을 나타내고, 아래첨자 s, A, B는 샌드위치 판재와 각 A 와 B 구성 판재를 나타낸다. 혼합 법칙은 굽힘 응력이 작용하지 않는다는 것과 등 변형률을 가정

하고 있다. 그런데 스테인리스 강/알루미늄 두 층 판재의 일축인장 거동은 굽힘 응력과 폭방향으로의 변형으로 휨 현상(warping phenomenon)을 보이는데도, 유동 응력의 거동은 혼합 법칙으로 설명되었다. 서로 다른 탄성 계수를 가진 복합 재료의 휨 현상은 보고되었다[2]. 그러나 이방성 성질을 고려한 클래드 금속의 소성 거동에 관한 연구는 보고된 바가 없다. 이 연구에서는 일축인장시 클래드 금속의 변형 거동을 제안한 이론과 Hill의 이차 항복식을 고려한 탄소성 유한요소해석을 이용하여 해석하였다.

## 2. 실험 방법

2.11mm 두께의 304 스테인리스 강 클래드 알루미늄 판재를 450°C에서 열간 압연 접합하여 제조하였다(표1). 클래드 금속의 구성 재료인 알루미늄과 304 스테인리스 강의 기계적성질을 측정하기 위해서 클래드 금속 제조할 때와 같은 열적·기계적 이력을 가하여 구하였다. 유동 곡선을 얻기 위해서 50mm 게이지 길이를 가진 인장 시편을 10mm/min 인장 시험 속도로 인장하였다. 소성변형비, R은 ASTM E 517-92에 따라 폭과 인장 방향으로의 진 변형률을 측정하여 얻었다. 인장 시편의 곡률반경은 Talysurf-50을 이용하여 측정하였다.

## 3. 이론적 해석

### 3-1. 인장 시험한 클래드 금속의 곡률반경의 계산

변형률이 큰 경우 인장 시편의 휨에 가장 큰 영향을 주는 기계적성질은 소성변형비이다. 이 해석의 첫 단계로 서로 분리된 상태에 있는 두개의 판재를 고려한다. 두개의 구성판재는 접합되어 있지 않은 경우 자유롭게 변형한다(Fig.1).

일축 인장을 가하는 경우 각 구성 층에서는 식(2)와 같이 폭 방향 변형률,  $\epsilon_{2f}$ 이 발생한다.

$$\epsilon_{2f} = \ln[d(z)/d_0] \quad (2)$$

여기서  $d_0$  와  $d(z)$ 는 각 변형 전과 변형된 후에 구성 판재의 폭이다.

만일 일축으로 변형되는 각 구성 판재들이 인접한 계면에서 서로 접합되어 있다면, 판재 양 끝에 작용하는 힘의 합이 영이 되어야 하고 이에 따른 변형,  $\epsilon_{2e}$ 가 발생한다.

$$\epsilon_{2e} = \ln[d_e/d(z)] \quad (3)$$

$$\sigma_1(z) = \sigma_0(z) + E_1(z) \left| \epsilon_{2f} \right| \quad (4)$$

$$\sigma_{2e} = E(z) \epsilon_{2e} \quad \left| \epsilon_{2e} \right| < \sigma_1/E(z) \quad (5a)$$

$$\sigma_{2e} = \frac{\epsilon_{2e}}{\left| \epsilon_{2e} \right|} \sigma_1(z) + E_1(z) \left[ \epsilon_{2e} - \frac{\epsilon_{2e}}{\left| \epsilon_{2e} \right|} \frac{\sigma_1(z)}{E(z)} \right] \quad \left| \epsilon_{2e} \right| \geq \sigma_1/E(z) \quad (5b)$$

$$F = \int_0^l \sigma_{2e} dz = 0 \quad (6)$$

여기서  $d_0$  와  $\sigma_{2e}$ 는 판재 양 끝에 힘이 작용하지 않는다는 조건을 만족하는 클래드 금속의 폭과 폭 방향 응력이다. 이때 재료에 유도되는 모멘트가 영이 되도록 하기 위해서는 굽힘 변형률이 발생한다. 클래드 금속의  $z$  위치에서의 폭 방향의 변형률,  $\epsilon_{2f}$ 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{2r} = \ln[\alpha(z)/d_c] \quad (7)$$

여기서  $\alpha(z)$  는 굽혀진 클래드 금속을 구성하는 판재의 원호 길이이다. 또한 중립면에서  $\varepsilon_{2r}$  는 존재하지 않음을 알 수 있다. 한편  $z_n$  와  $r_n$  를 중립면에서의  $z$  축의 위치와 곡률반경이라고 하면, 곡률반경  $r_n$  클래드 금속의 곡률반경으로 정의 할 수 있다. 따라서  $\alpha(z)$  는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha(z) = \alpha(z_n)(r_n - z_n + z)/r_n \quad (8)$$

폭 방향의 변형률로부터 폭 방향의 응력을 쉽게 계산하기 위해서 단지 각 구성 판재의 측면 변형률을 기본으로 한 탄소성 거동을 따른다고 가정하였다. 따라서 폭 방향의 응력,  $\sigma_2$ , 은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_{21} = \varepsilon_{2e} + \varepsilon_{2r} \quad (9)$$

$$\sigma_2 = E(z)\varepsilon_{21} \quad |\varepsilon_{21}| < \sigma_1/E(z) \quad (10a)$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_{21}}{|\varepsilon_{21}|} \sigma_1(z) + E_1(z) \left[ \varepsilon_{21} - \frac{\varepsilon_{21}}{|\varepsilon_{21}|} \frac{\sigma_1(z)}{E(z)} \right] \quad |\varepsilon_{21}| \geq \sigma_1/E(z) \quad (10b)$$

여기서  $E$  와  $E_1$  는 각각 구성 판재의 탄성 계수와 가공 경화 계수이다.

소성변형 시 체적 불변 조건으로부터 각 층의 인장 방향으로의 변형률과 변형 폭 사이의 관계는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\ln d(z) = -\varepsilon_1^p / (1 + 1/R(z)) + \ln d_0 - \nu(z)\varepsilon_1^p \quad (11)$$

여기서  $\varepsilon_1$  는 인장 방향 응력이고  $R(z)$  는  $(R_0 + 2R_{45} + R_{90})/4$  로 부터 구한 소성변형비이다.

정적인 평형에서 전체 힘과 모멘트는 영이 되어야 하고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = \int_0^t \sigma_2 dz = 0 \quad (12)$$

$$M = \int_0^t \sigma_2 (z - z_n) dz = 0 \quad (13)$$

여기서  $t$  는 시편의 두께이고, 변형 시 두께의 변화는 무시하였다. 수치적인 방법을 이용하여 식(12)와(13)으로부터  $z_n$  와  $r_n$  를 얻을 수 있다.

### 3-2. 클래드 금속의 탄-소성 유한요소 해석

해석에 사용한 재료는 Hill의 이방성 이차 항복 조건을 따른다고 가정하였다. Hill의 항복 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(\sigma_{ij}) = [F(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2N\sigma_{12}^2] / (R_0 + 1) - \bar{\sigma}^2 \quad (14)$$

여기서  $F, G, H$  와  $N$  는 이방성을 나타내는 상수들이고,  $\bar{\sigma}$  는 유효 응력이다.

위의 상수들은 다음과 같이 변형률 비의 항들로 표현할 수 있다.  $F = R_0/R_{90}$ ,  $G = 1$ ,  $H = R_0$ ,  $N = (R_{45} + 0.5) \cdot (R_0/R_{90} + 1)$  이때  $R_0 = \varepsilon_2/\varepsilon_3$  이고  $R_{90} = \varepsilon_1/\varepsilon_3$  이다. 유한요소해석에 사용한 재료성질은 표 2에 나타내었다. 그림. 2 는 경계조건과 함께 유한요소망을 보여 주며, 이때 클래드 금속을 모사하기 위해서 475개의 요소망을 사용하였다. 유한 요소 해석으로부터 유동 곡선을 얻기 위해서 그림.2의 중심 부위에 빗금 친 부분으로부터 응력을 계산하였다.

### 3-3. 클래드 금속의 유동 곡선에 미치는 소성 이방성의 영향.

두께방향 응력과 전단 응력이 없다고 가정하면, 클래드 금속의 유동 응력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{uc} = \sigma_{1A} V_A + \sigma_{1B} V_B \quad (15)$$

한편 구성 판재 A와 B에서의 폭 방향과 두께 방향으로의 응력은 다음과 같은 관계가 있다[3]

$$\sigma_{2c} = 0 = \sigma_{2A} V_A + \sigma_{2B} V_B \quad (16)$$

$$\sigma_{3A} = \sigma_{3B} = 0$$

여기서  $\sigma_1, \sigma_2$  와  $\sigma_3$  는 각각이 인장 방향, 측면 방향 그리고 두께 방향의 응력이다.(그림 3).

평면 응력 상태에서, Hill의 항복 기준은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{90}(\sigma_1)^2 + R_0(\sigma_2)^2 + R_0 R_{90}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 = R_{90}(R_0 + 1)X^2 \quad (17)$$

여기서  $\sigma_1$  와  $\sigma_2$  는 판재의 평면 내에서의 주응력이고,  $X$  는  $\sigma_1$  방향으로의 인장 항복 응력이다..

변형률 성분은 조합유동법칙을 사용하여 응력 함수로부터 얻을 수 있다.

$$d\varepsilon_{ij} - d\lambda \cdot \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \quad (18)$$

여기서  $d\varepsilon_{ij}$  와  $d\lambda$  는 각각 변형률 성분, 비례 인자이다. 평면 응력 조건하에 있는 평면 등방성 재료에 대해서, 식(17)로부터 응력 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(\sigma_{ij}) = \sigma_1^2 + (R_0/R_{90})\sigma_2^2 + R_0(\sigma_1 - \sigma_2)^2 \quad (19)$$

한편 식 (18),(19)과 체적 불변조건으로부터 아래와 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$R = d\varepsilon_2/d\varepsilon_3 = [(R_0/R_{90})\sigma_2 - R_0(\sigma_1 - \sigma_2)]/[-\sigma_1 - (R_0/R_{90})\sigma_2] \quad (20)$$

만일 클래드 금속의 구성 판재와 클래드 금속 자체가 같은 변형률 상태를 가진다고 가정한다면 소성변형비,  $R_c$  는 서로 같게 될것이다.

$$R_c = \frac{d\varepsilon_{2C}}{d\varepsilon_{3C}} = \frac{d\varepsilon_{2A}}{d\varepsilon_{3A}} = \frac{d\varepsilon_{2B}}{d\varepsilon_{3B}} \quad (21)$$

그러므로 식 (20)으로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$R_c = \frac{d\varepsilon_{2C}}{d\varepsilon_{3C}} = \frac{-[\sigma_{2A} R_0/R_{90} - R_0(\sigma_{1A} - \sigma_{2A})]}{(\sigma_{1A} + \sigma_{2A} R_0/R_{90})} = \frac{-[\sigma_{2B} R_0/R_{90} - R_0(\sigma_{1B} - \sigma_{2B})]}{(\sigma_{1B} + \sigma_{2B} R_0/R_{90})} \quad (22)$$

따라서  $\sigma_{1A}, \sigma_{1B}, \sigma_{2A}$  과  $\sigma_{2B}$  는 식 (16), (17) 과 (22)을 이용한 수치적인 방법으로 계산할 수 있다.

#### 4. 결과 및 고찰

그림. 4는 소성 이방성을 고려하여 계산한 클래드 금속의 일축 인장 시 변형된 요소망을 보여 주고 있다. 일축 인장 시 클래드 금속은 휨 현상을 보이고 있다. 그림. 5는 실험으로부터 구한 유동 곡선과 유한 요소 해석 및 혼합법칙으로부터 구한 것을 비교하여 보여 준다. 혼합법칙으로 구한 유동 곡선은 실험으로부터 구한 유동 곡선과 잘 일치하고 있다. 그림. 6 은 클래드 금속을 일축 변형 시 식(17)을 이용하여 계산한 각 층에서의 폭 방향 응력을 유한요소해석 결과와 비교하여 보여 주고 있다. 유한요소해석 결과가 식(17)의 결과보다 작은 값을 가졌는데, 그 이유는 유한요소해석에서는 휨에 의한 응력 이완(stress relaxation)을 고려하였기 때문이다. 그림 7 은 유한요소해석으로부터 구한 인장 방향 응력에 대한 폭 방향 응력, 두께 방향 응력 그리고 전단 응력의 비를 보여 주고 있다. 각 구성 판재에서의 폭 방향 응력, 두께 방향 응력 그리고 전단 응력은 인장 방향 응력에 비하여 무

시할 정도였다. 폭 방향 응력이 상대적으로 인장 방향 응력보다 작기 때문에 혼합 법칙이 클래드 판재의 유동곡선을 잘 나타내고 있는 것이다. 한편 클래드 판재에 발생하는 폭 방향의 응력은 계산에 사용한 항복 조건에 따라 그 값이 약간 변화한다[1]. 그림. 8 은 흰 시편의 곡률반경이 일축 변형이 증가함에 따라 감소함을 보여 준다. 한편 곡률반경은 구성 재료의 탄성 계수, 두께, 유동 응력 그리고 소성변형비에 의존한다[4,5]. 이 연구에서 서로 다른 소성변형비를 보이는 구성 판재로 이루어진 클래드 금속의 곡률반경은 구성 판재의 소성 변형비 차이에 크게 영향을 받았다[6]. 측정된 곡률 반경 값이 계산 값보다 크게 평가되었는데 그 것은 하중 제거 시 클래드 판재의 폭 방향으로 탄성회복에 의한 영향으로 판단된다.

### 5. 결론

스테인리스 강 클래드 알루미늄 판재의 일축인장상의 실험과 계산을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 클래드 판재는 일축인장시 구성 판재의 소성변형비 차이로 휨현상이 발생하였다.
2. 클래드 판재의 곡률반경을 예측하기 위해서 폭 방향의 변형률을 기본으로 하여 이론적으로 해석한 결과 실험치와 유사한 값을 얻었다.
3. 응력이완이 가능한 탄-소성 유한요소 해석으로 부터 얻은 폭 방향의 응력이 평면응력상태와 등 변형률을 가정하여 이론적으로 해석한 값보다 작은 값을 나타냈다.
4. 폭 방향 응력이 상대적으로 인장 방향 응력보다 작기 때문에 혼합 법칙이 클래드 판재의 유동곡선을 잘 나타냈다.

### 참고문헌

[1] D.N. Lee and Y.K. Kim, *J. Mater. Sci.*, 23 (1988), 558-564.  
 [2] P.H. Townsend, D.M. Barnett and T.A. Brunner, *J. Appl. Phys.*, 62 (1987), 4438-4444.  
 [3] S.L. Semiatin and H.R. Piehler, *Met. Trans. A*, 10A (1979), 85-96.  
 [4] S.-H. Lee and D.N. Lee, *J. Korean Inst. of Met. and Mater.* 32(1994) 729-733.  
 [5] J.-S. Yang, S.-H. Lee and D.N. Lee, unpublished result.  
 [6] S.-H. Choi, K.-H. Kim, K.-H. Oh and D.N. Lee, *Proceeding of the Second Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing*, 3 (1995), 2663-2668.

Table 1. Stainless steel/aluminum clad metal fabrication condition

Initial thickness (mm)		Total reduction (%)	Final thickness (mm)	Volume percent		Reduction (%)	
Stainless	Al			Stainless	Al	Stainless	Al
0.50	1.99	15.3	2.11	20.7	79.3	12	16

Table 2. Material properties used in FEM analysis.

Material	Young's modulus(GPa)	Poisson's ratio	$R_0$	$R_{45}$	$R_{90}$
Al	70	0.345	0.65	0.45	0.59
Stainless steel	200	0.29	0.78	1.02	0.83

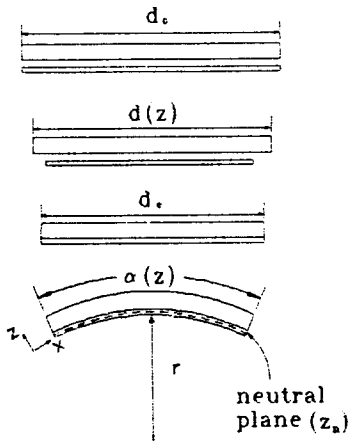


Fig. 1. Schematic diagram for explaining bending of the bilayer sheet under tension.

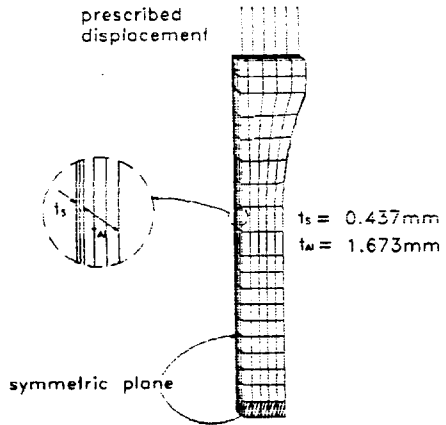


Fig. 2. Finite element mesh and boundary conditions for simulation of a clad metal.  $t_s$  and  $t_{Al}$  stand for thickness of stainless steel and aluminum layers.

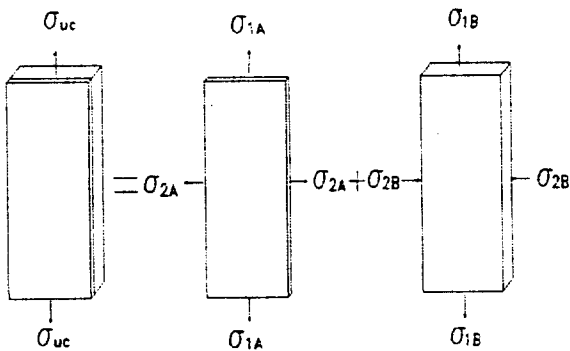


Fig. 3. Isostrain model for uniaxial tensile deformation of clad sheet metal.

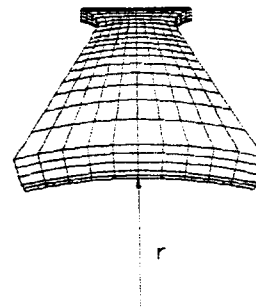


Fig. 4. Final deformation for  $\epsilon=0.38$

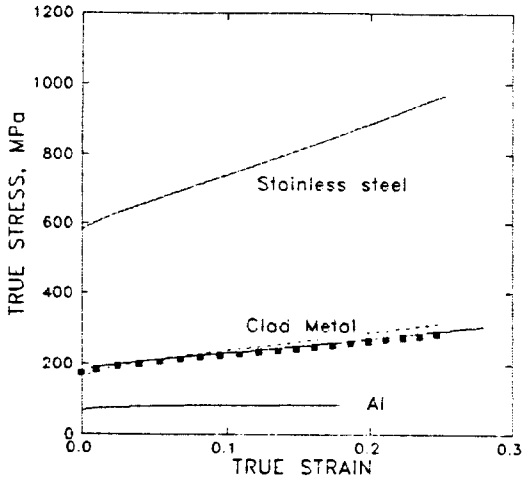


Fig. 5. Tensile curves of stainless steel clad Al sheet metal and its components. (■ ■ ■ Eq. (1); — Experimental; — FEM)

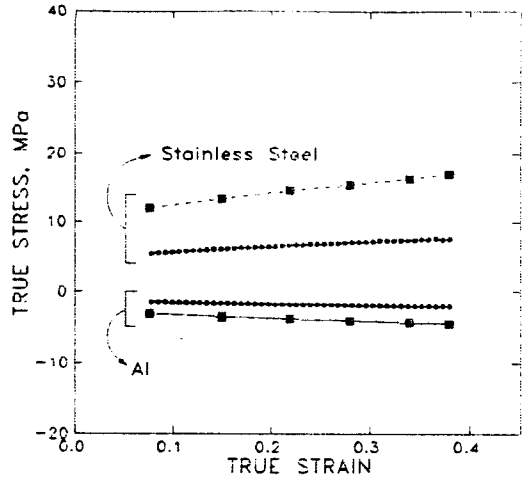


Fig. 6. Calculated transverse stresses in stainless steel and aluminum layers. (—■— Eq. (17); —●— FEM)

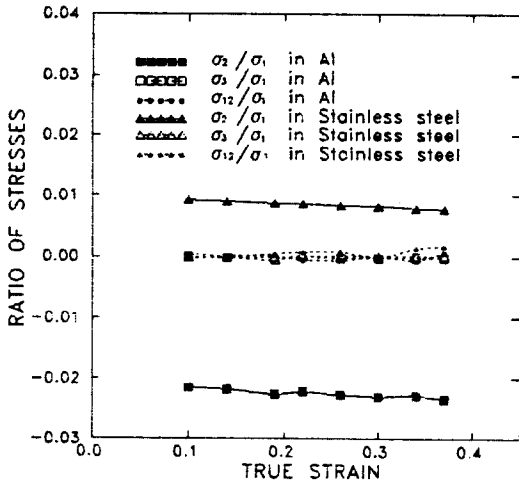


Fig. 7. The ratio of transverse stress and thickness stress to longitudinal stress in stainless steel and aluminum layers analyzed by FEM.

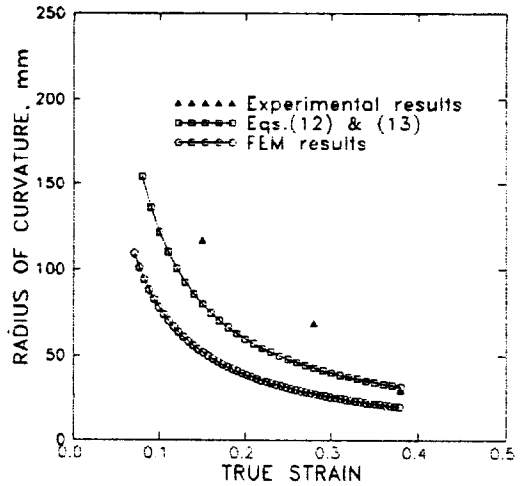


Fig. 8. The radius of curvature as a function of uniaxial strain.