

다층금속 경사재의 변형양태의 수치적연구

Numerical simulation for Deformation Shape of Declined Multilayer Metals Material

정 태 훈(중부대학교 메카트로닉스공학과)

Taehoon Chung (Dept.of Mechatronics Engineering, Joongbu Univ.)

ABSTRACT

By the use of a similar numerical method as that in the previous paper, the forming limit strain by coating method of clad sheet metals is investigated, in which the FEM is applied and J2G(J₂-Gotoh's corner theory) is utilized as the plasticity constitutive equation. Declined Multilayer Metals Materials are stretched in a plane-strain state, with various work-hardening exponent n-values and thicknesses of each layer. Processes of shear-band formation in such composite sheets are clearly illustrated. It is concluded that, in the bonded state, the higher limiting strain of one layer is reduced due to the lower limiting strain of the other layer and vice versa, and does not necessarily obey the rule of linear combination of the limiting strain of each layer weighted according thickness.

Key Words : Plasticity(소성), Elastic-plastic FEM(탄소성유한요소법), Forming Limit Strain(성형한계), J2G(J₂-Gotoh's Corner Theory), Shear-band(전단띠), Declined Metals Material(경사재료)

1. 서론

최근 많이 사용되고있는 2종 이상의 다른금속 또는 금속과 플라스틱이나 세라믹을 접합시켜 접합 또는 복합하는 금속계의 적층접합판재는 새로운 특성이 생겨 각각의 장점을 서로 보충할 수 있도록 한 재료로서 내식성, 재진성 등에 뛰어난 성질을 갖게 하고 또한 경량 및 저코스트의 목적으로 만든 금속클래드판, 박판 금속판, 수치샌드위치판 등의 여러종류가 개발되어 점차 사용이 확대되어 가고 있다. 그러나 이 적층접합판은 판두께방향에 기계적성질이 다른층이 존재하기 때문에 이 변형거동은 단일판에서 볼 수 없는 복잡한 변형거동이 존재하고 있다. 적층접합판을 사용 또는 개발하는 입장에서는 각각의 구성소재의 기계적성질을 통해 적층접합판의 변형거동을 예측하여 왔다. 즉, 단일판에 있어서 기초실험에 의해 r 값, n 값 등의 성형성 시험치를 구해 성형성을 논하는 것처럼 적층접합판에 대하여도 접합층에 의한 재료의 기초특성을 파악하고,

단일판과 같이 성형성을 논할 수가 있다. 그러나 실제는 재료의 앞·뒤 또는 속과 겉 등의 조합방법, 제품형상 등에 의해서 성형성은 크게 달라 개개의 변형상태에 따른 상세한 성형성의 논의가 필요하다. 이러한 필요성에 의해 적층접합판의 프레스 성형성을 시뮬레이션에 의해 예측 가능하다면 다종다양한 재료의 조합 또는 복합에 의해 실제 고성능제품 또는 다기능제품을 얻는 중추적 역할의 기술이 될 것이다. 따라서 이 기술의 개발은 앞으로 더욱 연구될 전망이며 또한 재료가공의 변혁, 국내외의 생산기술을 환경, 전지구적 자원, 에너지 등에 대응한 창조적 기술개발로 더욱 발전될 것이다. 수지를 조합했던 새로운 적층판재에 있어서는 판두께 방향의 재료성질이 다르기 때문에 개개의 변형상태에 대응한 성형성의 논의가 필요한 점은 같지만 금속적층판재와 성질이 크게 다르기 때문에 부재간의 스트레인의 전달이 불충분하다. 따라서 금속적층접합판과 다른 성형상의 문제점이 나타난다. 그러므로 금속적층접합판과 수치복합판은 별도로 논의할 필요가

있다. 그러나 판상의 재료에 대한 수치적 연구는 적은 실정이다. 금속접합판인 클레드판의 평면스트레인 굽힘에 대하여 전스트레인 이론을 이용한 齊藤¹⁾의 해석, Verguts-Sowerby²⁾, Majiessi-Dadras³⁾, 吉田⁴⁾의 중분이론에 의한 해석이 있지만 순수굽힘에 관한 해석의 결과이다. 또한 Devries, Landerbaugh⁵⁾는 이중금속 클레드판의 다이와 편치에 의한 굽힘의 간이해석에 대해 연구하였다. 또한 정태훈-後藤⁶⁾는 접합재 또는 경사재료의 싱형한계와 변형거동을 수치적으로 조사·검토하였다.^{6),(7),(8)} 본 연구에서는 판재의 기계적성질을 향상시키기 위하여 판두께방향에 연속적으로 기계적성질을 변화시킨 다층금속 경사재의 변형한계 특성에 관한 이론과 수치적으로 검토하였다. 여기서 다층 금속 경사재의 변형의 역학관계 관계 및 전단띠 형성에 의한 싱형한계를 수치적으로 구하고 변형거동을 관찰하여 시뮬레이션의 적용가능성을 나타내는 것을 주목적으로 하였다.

2. 기본이론

판재는 기하학적 특징, 즉 판면에 수직방향의 치수와 판두께가 판면내 치수에 비해 압도적으로 작기 때문에 국부넉킹(necking)의 발생을 파단이라고 생각하는 것이 일반적이다. 또한 수치적으로는 평면응력으로 취급하는 것이 상식화되어 있다. 따라서 Hill⁹⁾의 국부넉킹조건을 파단조건으로 하는 경우가 많았다. 여기서 국부넉킹이라는 것은 시각적으로는 판면에서 십자상의 선으로 보이는 판두께방향의 넉킹(necking)이며 종전부터 일종의 소성불안정현상으로서 알려져 왔다. 이것은 평면응력하의 국부분기로서도 취급하여 이론적 연구도 많이 행하여져 왔다. Hill은 Levy-Mises구성식을 사용하여 한 면내의 스트레인비 $a > 0$ 인 상황에서는 국부넉킹은 발생하지 않는 것에 대하여 나타냈다. 실제의 재료에서는 처음부터 어느 정도의 불안정이 있어, Marciniak & Kuczynski는 초기불안정을 고려하여 Levy-Mises구성식에서도 $a > 0$ 의 상황에서 국부넉킹을 갖는 판의 파단을 나타냈다¹⁰⁾. 그후 stören & Rice가 Levy-Mises구성식이 아닌 Hencky의 전스트레인 이론의 속도형을 이용하여 국부분기 즉 국부넉킹조건이 $a > 0$ 에 대하여도 생기는 것을 나타내어 처음으로 a 의 전영역에 대한 파단한계 조건을 나타냈다¹¹⁾. 국부분기조건은 소성구성식에 대한 의존성이 크기 때문에 따라서 변형이력이 복잡하게 되면 이 파단예측성능은 구성식의 정도에 따라 나쁘게 된다. 宅田은 판재에 압축성을 고려한 소성구성식에 의해 변형해석하여 재료내부의 밀도변화를 추출하여 이것에 한계치를 설정하는 것으로서 파단예측을 하였고¹²⁾, 또한 3차원 고찰을 한

것으로서 stören & Rice의 이론을 확장한 伊藤의 연구에서는 국부분기가 전단띠 이론이 되기 때문에 판재의 파단한계는 평면응력가정하에서의 국부넉킹조건에 의한 경우보다 높게 됨을 나타내었다¹³⁾. 또한 Gotoh는 소성구성식(J2G)을 제안하여 국부분기조건 즉 파단조건을 정하여 실험적 검증에 의해 적어도 실용레벨에서의 유용성을 나타내었다¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾.

이 J2G(J2-Gotoh's corner theory)를 변형의 수치시뮬레이션에 적용하여 이 때의 변형상태의 관찰과 하중의 급락 등과 시뮬레이션의 결과로서 생기는 국부넉킹을 싱형한계라고 판정하였다. 그러나 판재의 파단한계의 이론적 연구는 지금까지 거의 평면응력 가정 하에 행하여져 왔기 때문에 판두께 방향에 관한 고려를 할 수 없었다. 따라서 판두께 방향에도 요소분할하여 확장평면 스트레인 방법을 적용하여 판재의 싱형한계 변형의 판두께 의존성을 검토하였다⁶⁾. 싱형한계의 판정은 국부넉킹발생 후 두께방향으로 발생하는 전단띠(shear band)형성의 시점으로 하고 이러한 소성변형국소화를 표현하기에 적합한 소성구성식 J2G의 채용에 의해서 수치적 평가가 충분히 가능한 것을 확인하였다⁸⁾.

먼저 J2G구성식을 기술하면, 단 상세는 문헌을 참조한다^{(17),(18)}. 굵은 문자는 2계 텐서를 나타내고, t_r 은 trace의 기호이며 표시는 증분형식이다.

$$d\mathbf{e} = d\mathbf{e}^e + d\mathbf{e}^p$$

$$= (1/2G^*) d\mathbf{T} + \langle P(\theta) \rangle b/2\sqrt{\sigma} h_0 \overline{T} d\overline{\sigma}$$

(1)

$$t_r d\mathbf{e} = (1/3K) t_r d\sigma$$

(2)

여기서, $d\mathbf{e}$ 는 변형률증분 $d\mathbf{e}$ 의 편차, 첨자 e, p로서 탄성, 소성을 나타낸다. T 는 Cauchy응력 σ 의 편차,

$$d\mathbf{T} = d\mathbf{T} - d\omega\mathbf{T} + Td\omega,$$

$d\omega$ 는 강제회전증분이다. 또한

$$1/G^* = 1/G + \langle P \rangle / H_0, \quad G \text{는} \quad \text{횡탄성계수,}$$

$$P(\theta) = a + b \cos \theta,$$

$$P > 0 \text{에 대하여 } \langle P \rangle = P,$$

$$P \leq 0 \text{에 대하여 } \langle P \rangle = 0 \text{로서,}$$

$$b = 1 - a, a = h_0/H_0 = \cos \theta_0 / (1 + \cos \theta_0), \quad \text{또한}$$

$$\cos \theta = t_r (T \cdot d\mathbf{T}) / [t_r T^2 (t_r d\mathbf{T}^2)]^{1/2},$$

$$\overline{\sigma} = \sqrt{3/2} (t_r T^2)^{1/2} \quad \overline{d\sigma} = \sqrt{3/2} (t_r d\mathbf{T}^2)^{1/2} \neq d\overline{\sigma},$$

$h_0 = (1/3) \overline{d\sigma} / \overline{d\varepsilon}^p$ (비례부하)이다.

K 는 체적탄성계수이며 식(1)은 후속부하면에서의 부하점으로서 꼭지점(첨점)의 형성을 하고 있으며, θ_0 는 이 반정각을 나타낸다. 여기서,

$$\theta_0 = (\pi/2) - \rho \overline{\varepsilon}^{\rho}; \overline{\varepsilon}^p = \int d\varepsilon^p \quad (3)$$

가 되며, ρ 는 꼭지점 진전에 관한 재료정수이고, $\overline{\varepsilon}^p$ 는 스트레인경로의 전길이의 소성성분이며 일반적으로 $0 \leq \rho < 1$ 이다.

$\rho \equiv 0, \theta_0 \equiv \pi/2$ 에서는 꼭지점은 없고, 식(1)은 종래의 J2F(J₂-Flow theory)로 된다. 또한 소성성형에서는 $70^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ 에서 꼭지점의 진전은 없지만, 이 작은 꼭지점형성이 국부백킹 등 스트레인집중현상에 크게 기여한다. 위의 이론을 기본으로 하여 기계적성질이 다른 판두께방향의 각층의 가공경화 특성은 다음과 같은 가공경화식(n 승경화법칙)을 사용하였다.

$$\overline{\sigma} = C_i \overline{\varepsilon}^m,$$

$$C_i = \sigma_0 \times (\sigma_0/E)^{-m}; i는 층의 번호 \quad (4)$$

여기서 $\overline{\sigma}$ 는 상당응력, C 는 소성계수, $\overline{\varepsilon}$ 는 상당소성변형률, n 는 가공경화지수이다. 재료는 등방성이고 접합경계면의 박리는 없다고 가정하였다.

3. 수치해석

해석에는 증분적 탄소성대변형 해석으로서 1시스템의 증분량은 확장 r-min법에 의해서 각 요소내의 상당소성변형의 증분을 제어한다. 구성식은 J2G를 이용하고 삼각형 1차요소를 사용하였으며, 판두께 방향으로 요소분할하여 확장평면스트레인 방법을 적용하였다.

Fig.1과 같은 길이대 두께의 비가 3대1의 판재모델에서 판두께를 11등분할하였다. 모델을 양단 구속을 하고 스트레인의 집중이 예상되는 시험편 중앙부분은 특히 작게 요소분할을 하였다.

전체요소가 재료정수는 $E=200\text{GPa}$, $\nu=0.3$, $\sigma_0 = 400\text{MPa}$, $\rho=0.8$,로서 동에 상당하는 것으로서 같은 특성을 가졌고, n 값은 길이방향으로는 동일하지만 Table1과 같이 판두께방향으로 변화하는 것으로 하였다. 계산은 평면스트레인 $\alpha=0$ 에 한정하였다.

여기서 E 는 영률(GPa), ν 는 프아송비, σ_0 는 초기 항복응력(MPa), n 는 가공경화지수, ρ 는 J2G중에서 꼭

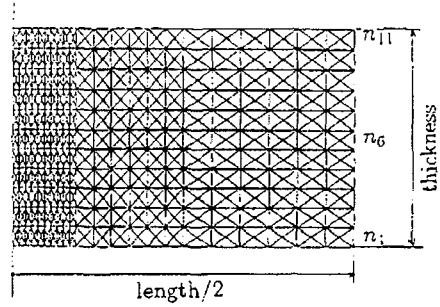


Fig.1 Model of declined multilayer sheet metals(plane strain)

지점의 성장속도를 규정하는 재료정수이다. 아래에 계산결과를 나타내었다.

Table 1 Model Types for Analysvs

Array of n-value	n_1	n_6	n_{11}	Max.difference of n-value(Type)
	0.2	→	0.05	0.15(A-1)
	0.5	→	0.01	0.49(A-2)
	0.2	0.05	0.2	0.15(B-1)
	0.5	0.01	0.5	0.49(B-2)
	0.05	0.2	0.05	0.15(C-1)
	0.01	0.5	0.31	0.49(C-2)
U-1 ~ U-4 : uniform n-value with n=0.01, 0.05, 0.2, 0.5, respectively.				

Fig.2는 전단미가 발생할 때의 스트레인을 나타냈다. 이것을 한계스트레인으로 판단하였다. 여기에서 n 값이 전체요소에서 같은(U-1~U-4)경우와 경사재료의 n 값의 최대차에 의한 비교를 하면 n 값의 영향이 큰 것과 최대 n 값이 큰 것이 한계스트레인도 큰 것을 알 수 있다. n 값의 변화폭이 같을 경우에는 판두께 방향으로의 n 값의 변화양식의 차이에 의해서 변형한계는 그다지 변하지 않는 것을 알 수 있다. 더욱이 상세히 보면 n 값의 변화폭이 동일하게 되어도 판표면에서 최대가 되고 판두께 중앙부에서 최소의 n 값 분포(V형)의 경우 변형한계가 최대가 된다. 반대로 n 값의 분포(Λ형)의 경우 변형한계는 최소가 되고, 단순직선적 분포의 경우에는 중위의 변형한계가 되는 것을 알 수 있다. 이상은 인장변형에 대한 경향이고 굽힘변형에 대하여는 다른 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 경사재료의 신장비-인장하중 곡선을 나타냈다. n 값의 변화가 0.01~0.5의 경우에 대하여 나타내었다. U/L 은 신장길이/초기길이이며, ↓는 전단미가 받

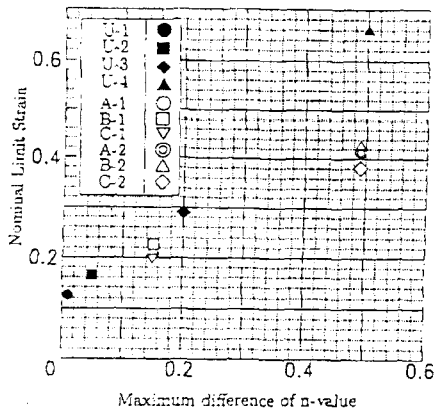


Fig. 2 Effect of declined multilayer material's n-value

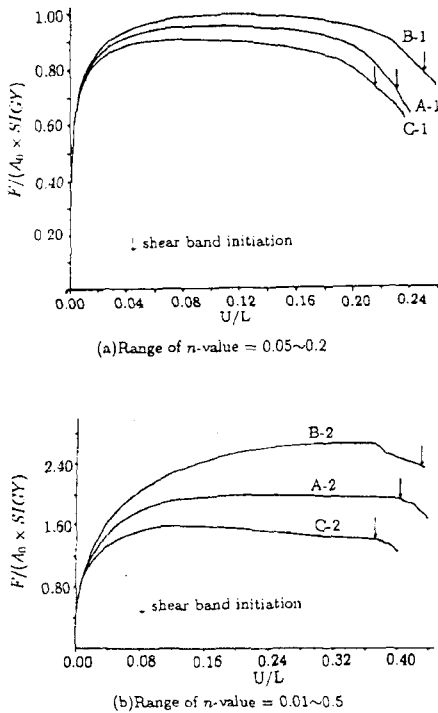
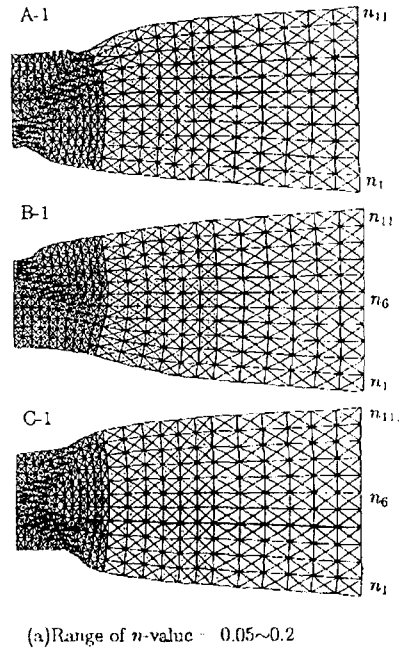


Fig. 3 Comparison of extension ratio-tensile load curves for declined multilayer materials

생되는 때를 나타낸다. 이와같이 변형한계의 차이가 하중의 변화곡선의 상이함에도 현저하게 나타나고 있다. 변형한계가 최대인 n값의 분포(V형)의 경우 하중도 가장 크다.

Fig. 4는 각 모델의 변형과정 중에 전단띠가 발생된 양태를 나타내었다. 그림 중 마크로 표시된 것은 소성상태 요소를 표시하고 있다. 그림(a)는 n값의 변화영역이 0.05~0.2, (b)는 0.01~0.5의 경우로서 n값의 분포양식에 의해서 상당히 다른 것을 알 수 있다. A-1, A-2의 그림에서 즉, n값이 직선분포인 경우 n값이 작은쪽부터 전단띠가 발생하고 점점 다른 표면으로 번지는 모양을 알 수 있다. B-1, B-2의 그림에서 즉 n값의 분포가 V형의 경우는 시편 중심부부터 불안정한 소성흐름이 발생하고 B-1에서는 표면으로 미치고 있는 모양을 알 수 있다. C-1, C-2에서는 n값의 분포가 \wedge 형이기 때문에 특히 양표면층에서 소성불안정이 발생하였고 C-1에서는 중심까지 파급되고 있다.

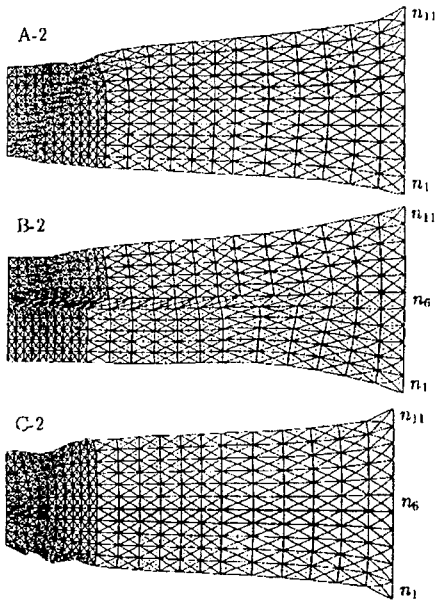


(a) Range of n-value = 0.05~0.2

IV. 결론

판재의 기계적성질을 향상시키기 위하여 판두께방향에 연속적으로 기계적성질을 변화시킨 다층금속 경사재의 변형한계 특성에 관한 이론과 수치적으로 검토하였다. 여기서 경사재의 경계 변형역학 관계 및 전단띠 형성에 의한 성형한계를 수치적으로 구하고 변형거동을 관찰하여 시뮬레이션의 적용가능성을 나타내어 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 판두께방향으로 n값의 변형영역폭이 동일한것과



(b) Range of n -value = 0.01~0.5

Fig. 4 Comparison of Shear-bend Shape

for declined multilayer materials

n 값의 분포의 양식이 V형, 직선형 및 \wedge 형의 순으로 변형한계가 높은 것을 알 수 있었다. 인장하중도 이순서로 높다.

(2)경사재의 전단파 발생양식은 n 값의 분포가 V형일 경우 먼저 중앙부에서 소성불안정으로 되고 표면부의 n 값이 충분히 크지 않을 경우는 표면으로 빠지는 전단파를 만든다. n 값이 직선분포의 경우는 n 값이 적은 표면부터 전단파가 발생하고 다른표면으로 변진다. n 값의 분포가 \wedge 형의 경우는 표면층만 변형이 산란되어 전단파가 중심까지 관통한다(중심부의 n 값이 크고 작음에 의해 변화).

본 논문에서 취급한 금속다층 경사재는 이론적 모델로서 한정적이다. 최근은 많은 형태의 기능성 복합 접합판이 고려되고 있으며, 복합접합판의 중요도는 이후 더욱 증가되어 가고 있다. 본 논문에서의 연구가 단서가 되어 보다 넓게 전개되기를 기대한다.

참 고 문 헌

1) 齊藤活一 ; 日本機械學會論文(A編), 21-102 (1955), 103
 2) Verguts, H & Sowerby, R. ; Int.J.Mech.Sci., 17-1 (1975), 31
 3) Majlessi, S.A. & Dadras, P ; ibid., 25-1 (1983), 1

4) 吉田總仁, 內當則明, 大森正信 ; 塑性と加工, 30-338 (1989), 358
 5) Devrics, W.R. & Lauderbaugh, L.K. ; J.Eng.Industry, 106 (1984), 62.
 6) 後藤學, 鄭泰勳 ; 日本機械學會論文(A編), 61-592(1995), 2636.
 7) 鄭泰勳, 後藤學 ; 日本機械學會論文(A編), 62-594(1996), 569.
 8) 鄭泰勳, 後藤學 ; 第46回塑性加工聯合講演會, 千葉, (1995-9), 161.
 9) Hill, R. ; J. Mech. Phys., Solids, 1-1(1952), 19.
 10) Marciniak, Z. and Kuczynski, k. ; Int. J. Mech. Sci., 9-9(1967), 609
 11) Stören, S. and Rice, J. R. ; J. Mech. Phys Solid, 23-6(1975), 421.
 12) 宅田裕彦, 森謙一郎, 八田夏夫 ; 第46回塑性加工聯合講演會, 千葉, (1995-9), 155.
 13) 伊藤耿一, 佐藤浩一, 秋谷暢久 ; 第46回塑性加工聯合講演會, 千葉, (1995-9), 149.
 14) 後藤學 ; 日本機械學會論文(A編), 50-658(1984), 1753.
 15) 後藤學, 三浦篤之, 平子誠 ; 塑性と加工, 30-342(1989), 1022.
 16) Gotoh, M. ; JSME Int. J., Ser, I, 34-3(1991), 297.
 17) Gotoh, M. ; Engng. Fracture Mech., 21-4(1985), 673.
 18) 後藤學 ; 日本機械學會論文(A編), 54-504(1988), 1579.