

전단띠형성에 의한 접합판의 성형한계 연구

정태훈*(서울산업대학 강사)

後藤學(日本 岐阜大學 教授)

Study of Forming Limit of Bonded Sheet Metals due to Shear Band Localization

Tae-Hoon CHUNG and Manabu GOTOH

ABSTRACT

By the use of a similar numerical method as that in the previous paper, the forming limit strain of bonded sheet metals is investigated, in which the FEM is applied and J2G(J₂-Gotoh's corner theory) is utilized as the plasticity constitutive equation. Bonded two-layer sheets and sheets bonded with dissimilar sheets on both surface planes 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.

1. 서론

금속박판의 프레스성형에 있어서 성형한계를 다루는 주요인의 한가지로서 파단현상은 종래부터 실험, 이론의 양면에서 많이 연구되고 있다. 그러나, 성형한계변형률은 재질이나 부하조건 등에 따라 다르기 때문에 실험만으로 보편적자료를 얻는 것은 상당한 어려움이 있다. 따라서 이론적 예측의 가능성에 대한 기대가 높다. 이러한 요망에 최근 잘 적합한 수법, 즉, 파단에 직결하는 국부넉킹의 발생을 예리하게 시뮬레이션할 수 있는 소성구성식으로서 소위 꼭지점경화형소성의 일종인 J2G(J₂-Gotoh's corner theory)를 변형의 수치시뮬레이션에 적용하여 이때의 변형양태의 관찰과 하중의 급락 등과 시뮬레이션의 결과로서 생기는 국부넉킹을 성형한계라고 판정하였다. 또한 금속판재의 성형한계의 이론적 연구는 지금까지 거의 평면응력 가정하에 행하여져왔다. 따라서 판두께방향에 관한 고려는 할수 없었다. 그래서 본 저자는 탄소성유한요소법에 의한 수치적방법을 이용하여 판두께방향에도 요소분할하는것으로서 판두께방향을 고려하는 모델을 제안하였다. 이 연구에서 판재의 성형한계변형률의 판두께의존성을 확장평면스트레인에 의하여 논하였다. 더우기 두께방향으로 재료특성이 연속적으로 변화하는 경사재료의 성형한

계에 대하여 평면변형률에 한정하여 검토하였다. 성형한계의 판정은 국부넉킹 발생후 두께방향으로 발생하는 전단띠(Shear band)형성의 시점으로 하고 이러한 소성변형국소화를 표현하기에 적합한 소성구성식으로서 J2G를 채용하였다. 그 결과 이 수법으로 성형한계의 평가가 충분히 가능한것을 확인하였다^{1,2)}.

본 논문에서는 같은 수법으로 최근 많이 사용되는 2종금속의 접합판에 대하여 여러재질의 조합한것에 관하여 평면스트레인에 한정하여 검토하였다. 특히 이중금속판의 접합이 전단띠형성의 양태에 미치는 영향과 전단띠 발생한계(성형한계)에의 접합의 효과에 주목하였다. 접합경계의 박리는 없는것으로 하였다.

2. 기초이론

먼저 J2G구성식을 기술하면, 단 자세한 상세는 문헌을 참조한다^{3,4)}. 굵은문자는 2계 텐서를 나타내고 t_r 은 trace의 기호이며 표시는 증분형식이다.

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

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

$$t_r d\mathbf{e} = (1/3K) t_r d\sigma \quad (2)$$

여기서, $d\mathbf{e}$ 는 변형률증분 $d\mathbf{e}$ 의 편차, 첨자 e, p로서

탄성, 소성을 나타낸다. T 는 Cauchy응력 σ 의 편차,
 $dT = dT - d\omega T + Td\omega$, $d\omega$ 는 강체회전증분이다.

또한 $1/G^2 = 1/G + \langle P \rangle / H_0$, G 는 횡탄성계수,
 $P(\Theta) = a + b \cos \Theta$, $P > 0$ 에 대하여 $\langle P \rangle = P$, $P \leq 0$ 에
 대하여 $\langle P \rangle = 0$ 로서,

$$b = 1 - a, a = h_0 / H_0 = \cos \Theta_0 / (1 + \cos \Theta_0), \text{ 또한}$$

$$\cos \Theta = t_r (T \dot{T}) / [t_r T^2 (t_r \dot{T}^2)]^{1/2},$$

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

$h_0 = (1/3) \overline{d\sigma} / \overline{d\epsilon^p}$ (비례부하에 대하여)이다.

K 는 체적탄성계수이며 식(1)은 후속부하면에서의
 부하점으로서 꼭지점(첨점)의 형성을 하고 있으며,
 Θ_0 는 이 반정각을 나타낸다. 여기서,

$$\Theta_0 = (\pi/2) - \rho \epsilon^2; \epsilon = \int \overline{d\epsilon^p} \quad (3)$$

가 되며, 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 소성형성에서는 $70^\circ < \Theta_0 < 90^\circ$
 에서 꼭지점의 발달은 없지만, 이 적은 꼭지점형성이
 국부넉킹 등 스트레인지중현상에 크게 기여한다. 위
 의 이론을 기본으로 하여 기계적성질이 다른 접합판
 에 대하여 복합화의 효과를 평면스트레인에 대해서
 조사하였다. 이 경우 다음과 같은 가공경화식(n 승경
 화법칙)을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = c_1 \bar{\epsilon}^n; \bar{\epsilon} \text{는 재료의 종류} \quad (4)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 상당응력, c_1 는 소성계수, $\bar{\epsilon}$ 는 상당소성
 변형률, n 는 가공경화지수이다.

3. 접합판의 성형한계

해석에는 중분적탄소성대변형해석으로서 1스텝의
 증분량은 확장 r-min법에 의해서 각요소내의 상당소
 성변형률증분을 제어한다. 구성식은 J2G를 이용하고
 삼각형1차요소를 사용하였다. 계산은 기후대학정보
 처리센터 부설의 대형전자계산기FACOM M-770/10
 을 사용하였다.

Fig.1과 같은 모델을 양단구속의 조건으로하고, 모
 델I은 판두께와 길이의 비가 1:3으로서 모재의 A재
 료에 대하여 B재료의 두께는 전체초기판두께의 β 배
 로 하여 접합하였다. 모델II는 모델I과 같은 비율로
 서 B재료를 앞뒤양쪽으로 접합하였다. 이 경우는 대
 칭성이므로 1/4만 해석한다. 이 그림에서 보는바와
 같이 스트레인의 집중이 예상되는 시험편 중앙부분

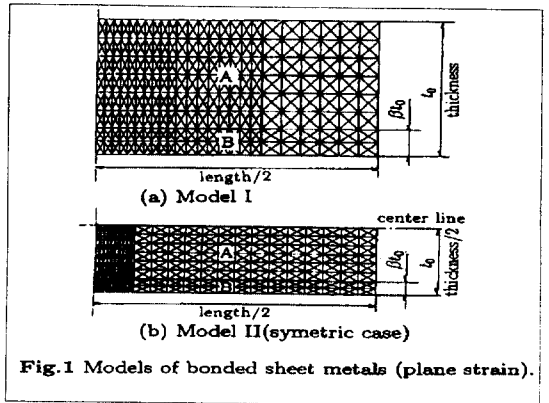


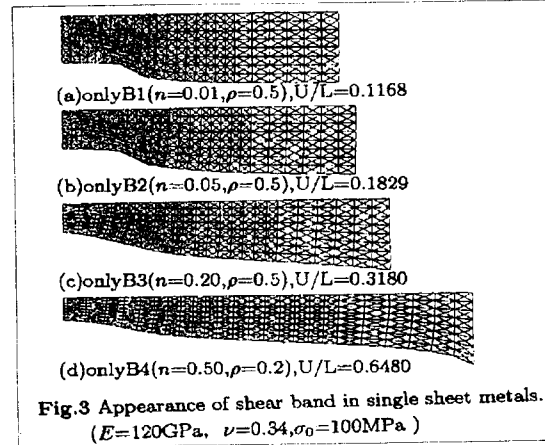
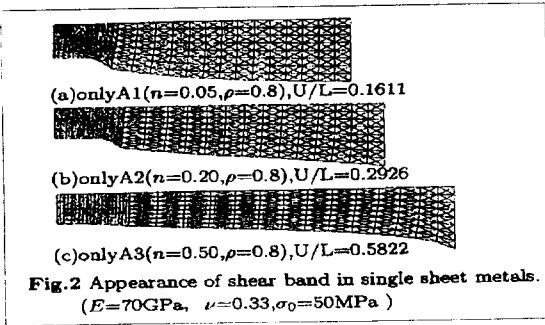
Fig.1 Models of bonded sheet metals (plane strain).

Table 1 Material constants of single and bonded sheet metals.

Type	A-material					B-material					
	E	ν	σ_0	n	ρ	E	ν	σ_0	n	ρ	β
onlyA1	70	0.33	50	0.05	0.8	-	-	-	-	-	-
onlyA2	70	0.33	50	0.20	0.8	-	-	-	-	-	-
onlyA3	70	0.33	50	0.50	0.8	-	-	-	-	-	-
onlyB1	-	-	-	-	-	120	0.34	100	0.01	0.5	-
onlyB2	-	-	-	-	-	120	0.34	100	0.05	0.5	-
onlyB3	-	-	-	-	-	120	0.34	100	0.20	0.5	-
onlyB4	-	-	-	-	-	120	0.34	100	0.50	0.2	-
bimet1	70	0.33	50	0.05	0.8	120	0.34	100	0.20	0.5	0.2
bimet2	70	0.33	50	0.05	0.8	120	0.34	100	0.20	0.5	0.5
bimet3	70	0.33	50	0.05	0.8	120	0.34	100	0.50	0.2	0.2
bimet4	70	0.33	50	0.05	0.8	120	0.34	100	0.50	0.2	0.5
bimet5	70	0.33	50	0.20	0.8	120	0.34	100	0.01	0.5	0.2
bimet6	70	0.33	50	0.20	0.8	120	0.34	100	0.05	0.5	0.2
bimet7	70	0.33	50	0.50	0.8	120	0.34	100	0.01	0.5	0.2
bimet8	70	0.33	50	0.50	0.8	120	0.34	100	0.05	0.5	0.2
bimet1B	120	0.34	100	0.20	0.5	70	0.33	50	0.05	0.8	0.2
bimet2B	120	0.34	100	0.20	0.5	70	0.33	50	0.05	0.8	0.5
bimet3B	120	0.34	100	0.50	0.2	70	0.33	50	0.05	0.8	0.2
bimet4B	120	0.34	100	0.50	0.2	70	0.33	50	0.05	0.8	0.5
bimet1S	70	0.33	50	0.05	0.8	120	0.34	100	0.20	0.5	0.2
bimet2S	70	0.33	50	0.05	0.8	120	0.34	100	0.20	0.5	0.5
bimet3S	70	0.33	50	0.05	0.8	120	0.34	100	0.50	0.2	0.2
bimet4S	70	0.33	50	0.05	0.8	120	0.34	100	0.50	0.2	0.5
bimet1SB	120	0.34	100	0.20	0.5	70	0.33	50	0.05	0.8	0.2
bimet2SB	120	0.34	100	0.20	0.5	70	0.33	50	0.05	0.8	0.5
bimet3SB	120	0.34	100	0.50	0.2	70	0.33	50	0.05	0.8	0.2
bimet4SB	120	0.34	100	0.50	0.2	70	0.33	50	0.05	0.8	0.5

은 특히 작게 요소분할을 하였다. n 치는 Table 1과
 같이 주어지고 계산은 평면스트레인에 한정하였다.
 n 치가 전요소에서 같은 경우(onlyA1-onlyB4)도 해
 석하였다. 이것들과 접합재의 재료정수는 Table 1에
 나타내었다. 여기서 E는 영률(GPa), ν 는 포아송비,
 σ_0 는 초기항복응력(MPa), n 는 가공경화지수, ρ 는
 J2G중의 꼭지점의 성장속도를 규정하는 재료정수이
 다. 아래에 계산결과를 나타내었다.

Fig.2와 Fig.3은 본해석에 사용한 재료들의 전단파
 가 발생하고 있는 상태를 나타냈다. 도시의 인장률에
 있어서 Fig.2에서는 n 치가 0.2(onlyA1, onlyA2)까지
 전단파가 확실히 형성하지만, n 치가 0.5(onlyA3)일때
 는 명료하게 나타나지 않았다. Fig.3에서는 n 치가
 0.05(onlyB1, onlyB2)만 전단파가 확실히 형성하지만,
 n 치가 0.2이상(onlyB3, onlyB4)에서 전단파가 아직



발생하고 있질 않다. Fig. 2(b)와 Fig. 3(c)의 비교로부터, 전단띠 발생에는 n 치만이 아니고 ρ 치도 작용하고 있는것을 알수 있었다.

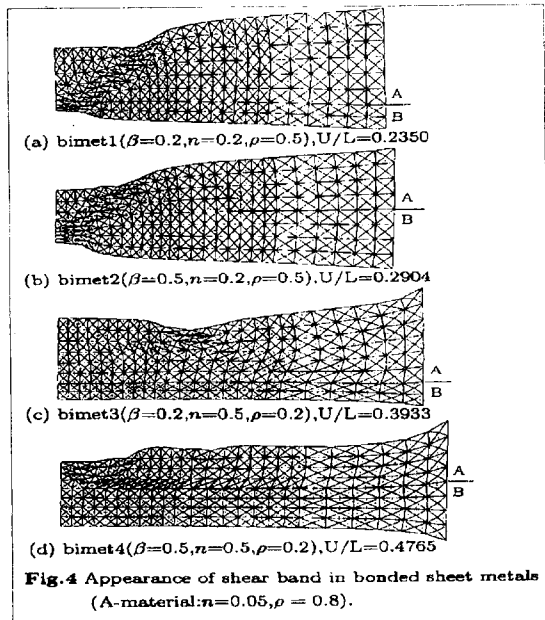


Fig. 4는 Fig. 1(a)과 같은 모델을 이용한 경우로서, 재료의 특성치는 모재의 A가 $E=70\text{GPa}, \nu=0.33, \sigma_0=50\text{MPa}, n=0.05, \rho=0.8$ 로서 일정하게 하였다. 접합한 B재료는 $E=120\text{GPa}, \nu=0.34, \sigma_0=100\text{MPa}$ 로서 B재료의 두께비와 n 치, ρ 치만을 변화시켜서 계산한 경우의 전단띠가 발생하고 있는 상태를 나타내고 있다. A와 B는 A재료와 B재료의 경계를 나타낸다. 이 그림으로부터 국부넉킹내의 전단띠타입의 스트레인집중띠가 명확히 발생하고 있다. A재료가 B재료의 n 치보다 작기때문에 A측으로부터 전단띠가 발생하고 있다. A의 n 치가 0.05인 (a), (b)에서는 B의 n 치가 0.2이기 때문에 전단띠는 시험편 전체를 관통하고 있다. Fig. 3(c)를 고려하면 A에 발생한 전단띠의 영향으로 B에도 전단띠가 유기되는것을 알수있다. 한편, (c), (d)에서는 B의 n 치가 0.5로 크기 때문에 $\beta=0.2$ 에 대해서만 전단띠 내지 스트레인집중역은 B에 미치지 않았다. $n=0.5$ 라 하는 값은 전단띠의 발생만이 아니고 그의 전파에 대해서도 충분히 저항할 정도로 크기 때문이다(Fig. 2(c), Fig. 3(d)도 참조).

이상에 있어 각계산에서 전체의 증분스텝에 대한 변형형상을 프린트아웃할 수 없기 때문에 임계상태가 정확하게 추출되었다고는 할수없다. 아래의 테이블도 이런 종류의 오차를 포함하고 있다.

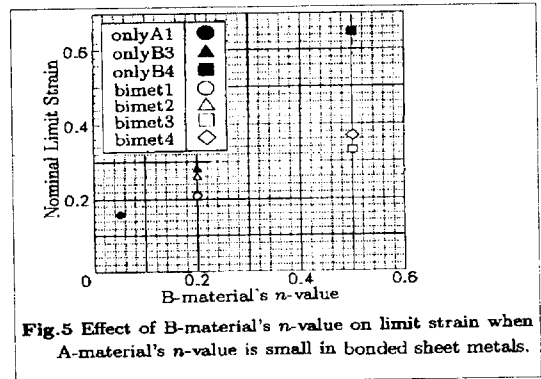


Fig. 5는 Fig. 4의 재료와 단지 A, B재료만의 경우의, 전단띠가 생길때의 변형률(이것을 한계변형률이라 판정함)을 정리한 것이다. 단, 편의상 공칭변형률을 이용하고 있다. Fig. 5에 의해 다음의 것을 알았다 n 치가 0.05의 A재료를 모재라 하고 그것보다 큰 n 치의 B재료를 접합하는 것에 의해 B의 n 치가 클수록, 또한 B의 두께가 클수록 성형한계는 향상한다. 단, B의 두께의 차이는 그다지 효과가 없다. 또한 반대로 $n=0.5$ 의 큰 B재료에 있어서 A와의 접합에 의해 성형한계의 저하가 현저한 것을 알았다.

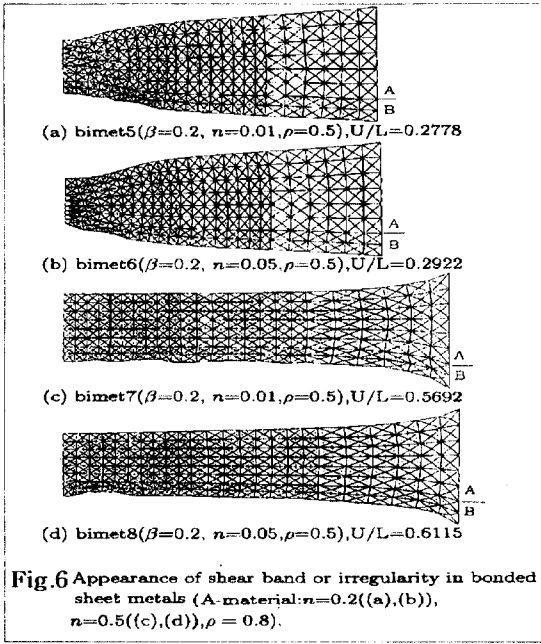


Fig.6 Appearance of shear band or irregularity in bonded sheet metals (A-material: $n=0.2$ (a),(b), $n=0.5$ (c),(d), $\rho=0.8$).

Fig.6는 Fig.4와는 반대로 A재료의 n 치를 크게 하고, B재료의 n 치를 작게 하여 또한 이 두께비를 일정($\beta=0.2$)하게 하여 해석한 것으로서 전단띠가 발생하고 있을 때의 모양을 나타내고 있다. 이 경우 B재료를 피복층이라 하면 A의 n 치가 0.2의 경우 이 그림의 (a), (b)에서 $n=0.01, 0.05$ 로 한 낮은 n 치의 피복의 영향으로 모재의 A에도 빠르게 전단띠가 유가 되는 것을 확인하였다.

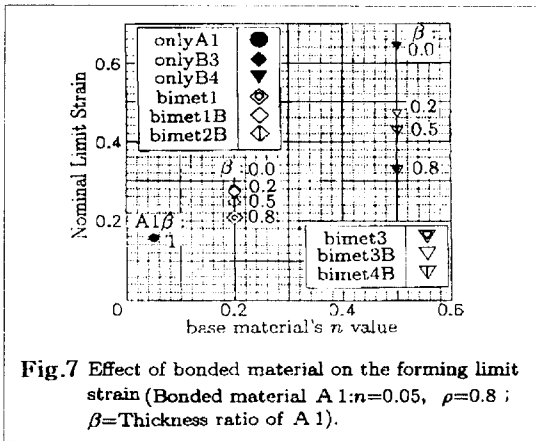


Fig.7 Effect of bonded material on the forming limit strain (Bonded material A $n=0.05$, $\rho=0.8$; β =Thickness ratio of A 1).

Fig.7에서는 이상의 데이터를 기반으로 하여, $n=0.2$ 및 0.5 의 판에 $n=0.05$ 의 판(A1)을 각종 두께로 접합할 경우의 한계변형률을 나타내었다. 그림중 β 는 A1의 전두께에 대한 비율을 나타낸다. $n=0.2$ 의 판에의 접합의 경우는 전단띠가 두께 전체에 걸쳐서 관통하기 때문에 정확한 의미의 성형한계변형률을

나타내고 있지만 $n=0.5$ 의 판에의 접합의 경우는 불안정변형이 생겼으면서도 접합시킨 판만에 한정되기 때문에 프롯트점은 접합판이 불안정변형이 발생하기 시작하는 한계변형률을 의미한다.

접합판의 한계변형률이 각판의 한계변형률의 두께에 비례한다고 하는 단순선형법칙을 가정하면

$$\epsilon_{l11a} = \beta \cdot \epsilon_{A11a} + (1-\beta) \cdot \epsilon_{B11a} \quad (5)$$

이 된다. 여기서 ϵ_{A11a} , ϵ_{B11a} 은 A1재(A)만, 또는 접합시킨 판B만의 한계변형률이다. Fig.7의 결과와 식(5)에 의한 결과를 비교하여 Table 2에 수치데이터로서 나타냈다.

Table 2 Summarizing the limit strains (by FEM and Eqn.(2)).

β ($n_A=0.05$)	$n_B=0.2$		$n_B=0.5$	
	ϵ_{FEM}	ϵ_{cal}	ϵ_{FEM}	ϵ_{cal}
0.0	0.28	0.28	0.65	0.65
0.2	0.26	0.26	0.47	0.55
0.5	0.24	0.22	0.43	0.41
0.8	0.21	0.18	0.33	0.26
1.0	0.16	0.16	0.16	0.16

ϵ_{FEM} : Limit strain by FEM.

ϵ_{cal} : Limit strain by equation (2).

다음에, 이종판을 모재의 앞뒤양면에 접합한 경우의 계산결과에 대한 것으로서 해석은 Fig.1(b)의 모델II를 이용하였다.

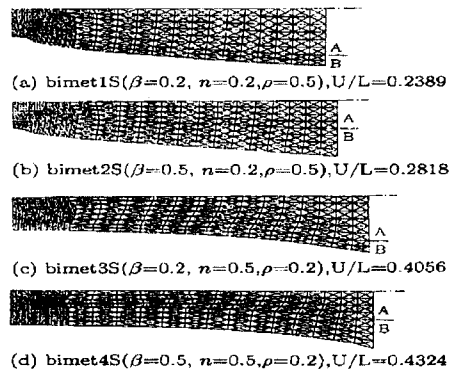


Fig.8 Appearance of shear band and unstable deformation in sheet metals bonded on both sides sheet metals: Model II (A-material: $n=0.05$, $\rho=0.8$).

Fig.8은 재료의 특성치가 모재(싱재인) A가 $E=70GPa$, $\nu=0.33$, $\sigma_0=50MPa$, $n=0.05$, $\rho=0.8$ 로서 일정하게 하였다. 접합한 B재료는 $E=120GPa$, $\nu=0.34$, $\sigma_0=100MPa$ 로서 B재료의 두께비와 n 치, ρ 치만을 변화시켜서 계산한 경우의 전단띠가 발생하고 있는 상태를 나타내고 있다. A와 B는 A재료와 B재료의 경계를 나타낸다. 싱재A의 n 치가 0.05로 작기 때문에

외장재(피복재)B의 n치가 0.2인 경우는 Fig.8(a), (b) 처럼 상재에서 발생한 전단띠가 외표면까지 퍼지는 형으로 된다. 또한 외장재의 n치가 0.5로 큰경우는 (c), (d)처럼 변형의 산란이 표층까지 미치지 않고 있다. 또한 상재 자체의 변형도 비교적 산란이 적다. 이 점은 한쪽외장의 경우와 크게 다르며, 양측피복의 경우는 외장재에 의해 상재의 불안정변형 억제효과가 크다는 것을 확인하였다.

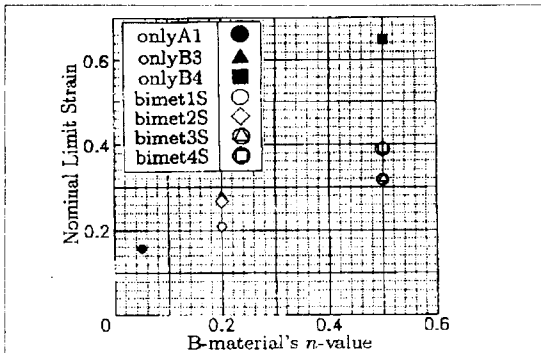


Fig.9 Effect of B-material's n-value on the limit strain when A-material's n-value is small (Model II).

Fig.9는 Fig.8의 접합재의 한계변형률과 이 해석에 사용했던 재료 각각의 한계변형률을 비교하였다. 단, B의 n치가 0.5의 프루트는 상재에 산란이 생길때의 변형률이며 꼭 한계변형률이라고는 할수없다. 역시, n치가 작은 A재료만의 한계변형률(onlyA1)보다, n치가 큰 피복재B(onlyB3, onlyB4)의 영향에 의해 접합재의 한계변형률이 크게 되고 있다. 이 정도는 B의 n치가 클수록, 또한 이 두께가 두꺼울수록 커진다.

이외에 해석하였던 외양측접합재의 해석결과와 검토결과는 지면관계상 다음의 결론만으로 약술하였다.

4. 결 론

최근 많이 쓰이고 있는 2종의 금속접합판에 대해 재질의 조합에 의해 평면변형($\alpha = 0$)에 한정하여 검토했다. 특히, 이중금속판의 접합이 전단띠형성의 모양에 미치는 영향과 전단띠발생한계(성형한계)에서 접합의 효과에 주목했다. 본 논문을 통해서, 접합경계의 박리는 없는 것으로 했다. 이것은 복합재료에 있어서 전단띠형성에 관한 연구의 시축을 만든 것으로 생각한다. 얻어진 주요한 결과는 아래와 같다.

(1) 단일재료의 판재에 대해 전단띠발생 변형률을 지배하는 주요한 인자는 가공경화지수 n치이며, 또 J2G에 포함되는 재료정수 ρ 치도(n치 만큼은 효과는 없지만)관계하고 있는 것을 확인했다. n치가 클수록 또 ρ 치가 작을수록 한계변형은 커진다.

(2) 2종재료 A,B(n치가 각각 n_A, n_B)의 2층 접합판의 경우, $n_A = 0.05$ 로 작을 때 B층의 전두께에 대한 두께비를 ($\beta = 0.5$)라 하고 $n_B = 0.2$ 이면 β 에 관계없이 전단띠가 A층 표면으로 부터 발생하고 판전체를 경사형태로 B층표면으로 전파된다.

$n_B = 0.5$ 로 크면 $\beta = 0.2$ 로 작을 때도 불안정변형은 A층내에 도달한다.

(3) (2)와 같은 경우에 있어서 역으로 n_A 가 크고 $n_B = 0.05$ 로 작을 때 n_A 가 0.2면 $\beta = 0.5$ 에 관계없이 전단띠는 B층에 발생하고 A층내에도 유기되어 시편의 전두께에 걸쳐 일어난다. $n_A = 0.5$ 이면 불안정 변형은 B층내에 도달한다.

(4) 이상(2),(3)에 있어서,전단띠 내지 어느 한쪽의 층에 불안정 변형이 생기는 한계변형에 주목하면, 각각의 층에 단일재의 한계변형률에 비하여, β 에 관계없이, n치가 크게되는 층은 작게되는 층의 영향으로 한계변형률은 저하하며, 작은층은 큰층의 영향으로 향상된다. 2층의 n치가 0.05와 0.2일 때는 접합판의 한계변형률은 각각의 층단일의 한계변형률비의,두께비의 대소를 가진'선형법칙'에 대체로 따른다. n치가 0.05와0.5일 때는 선형법칙에서 벗어나 얇은층의 영향이 강하게 나타난다.

(5) A재를 상재로서 B재를 앞,뒤 양측에 접합할 경우, 상재A의 $n_A = 0.05$ 로 작게하면 $n_B = 0.2$ 일때는 $\beta (\leq 0.5)$ 에 관계없이 A층부터 전단띠가 발생되어 B층표면에 퍼진다. 전시편의 중심으로부터 보면 전단띠의 양태는 역V자형으로 되고, 다른 경우와는 반대의 모드로 있다. $n_B = 0.5$ 일때 상재는 다소의 불안정현상을 발생하면서도 B층의 영향으로 고변형율까지 거의 안정한 변형을 한다.

이상 본 논문에서 취급한 접합판은 한정적이다. 최근은 무수라하는 형태의 복합판이 고려되고있으며, 복합판의 중요도는 이후 더욱 증가되어 간다고 생각된다. 본 논문에서의 연구가 단서가 되어, 보다 넓게 전개되기를 기대한다.

참고문헌

- 1) 後藤學, 鄭泰勳 : 日本機械學會論文(A편), 61-592(1995-12), 2636.
- 2) 鄭泰勳, 後藤學 : 日本機械學會論文(A편), 62-594(1996-2), 569.
- 3)Gotoh, M. : Engng. Fracture Mech., 21-4(1985), 673.
- 4) 後藤學 : 日本機械學會論文(A편), 54-504(1988), 1579.