

코팅재의 변형한계에 대한 수치적연구

Numerical Investigation of Forming Limit of Coated Sheet Metals

정태훈(서울산업대학교), 김종호(서울산업대학교)
Tae-Hoon CHUNG and Jong-Ho KIM

ABSTRACT

By the use of a similar numerical method as that in the previous paper, the forming limit strain of coated sheet metals is investigated, in which the FEM is applied and J2G(J₂-Gotoh's corner theory) is utilized as the plasticity constitutive equation. Coated 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 coated 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), Elasto-plastic FEM(탄소성유한요소법), forming limit strain (성형한계스트레인), coated sheet metals(코팅재), J2G(J₂-Gotoh's corner theory), shear-band(전단띠)

1. 서 론

강판의 내식성 향상을 위해 또한 자연환경에 노출되어 사용되는 금속 예를 들어, Zn, Sn, Cu, Al, Cr 등을 도금하는 방법은 예전부터 잘 알려져 있는 기술이다. 그러나 도금을 실시한 강판과 표면처리강판, 유기재를 피복시켜 내식성을 높인 강판 등의 코팅재를 프레스성형에서 사용하는 기술은 최근부터 발달해 왔다고 해도 과언이 아니다. 특히 Zn도금강판에 있어서는 자동차 차체의 내식성향상을 위해 그 적용이 검토되면서 프레스 성형성이 개선, 확립되어 실용에 이르렀다⁽¹⁾.

이러한 코팅재의 프레스 성형성에 영향을 주는 인자중에서 *r*치, *n*치, 모재와 피복재의 두께비율 등이 성형한계에 많은 영향을 주고 있다.

이러한 코팅판재의 파단한계(성형한계)를 유한요소법에 의해 수치시뮬레이션하여 예측한다는 것은 흥미 깊은 일이다.

판재는 기하학적 특징, 즉 판면에 수직방향의 치수와 판두께가 판면내 치수에 비해 압도적으로 작기

때문에 국부넥킹(necking)의 발생을 파단이라고 생각하는 것이 일반적이다. 또한 수치적으로는 평면응력으로 취급하는 것이 상식화되어 있다. 따라서 Hill⁽²⁾의 국부넥킹조건을 파단조건으로 하는 경우가 많았다. 여기서 국부넥킹이라는 것은 시각적으로는 판면에서 십자상의 선으로 보이는 판두께방향의 넥킹(necking)이며 종전부터 일종의 소성불안정현상으로서 알려져 왔다. 이것은 평면응력하의 국부분기로서도 취급하여 이론적 연구도 많이 행하여져 왔다.

Hill은 Levy-Mises구성식을 사용하여 한 면내의 스트레인비 $\alpha > 0$ 인 상황에서는 국부넥킹은 발생하지 않는 것에 대하여 나타냈다. 실제의 재료에서는 처음부터 어느정도의 불안정이 있어, Marciniak & Kuczynski는 초기불안정을 고려하여 Levy-Mises구성식에서도 $\alpha > 0$ 의 상황하에서 국부넥킹을 갖는 판의 파단을 나타냈다⁽³⁾.

그후 stören & Rice가 Levy-Mises구성식이 아닌 Hencky의 전스트레인 이론의 속도형을 이용하여 국부분기 즉 국부넥킹조건이 $\alpha > 0$ 에 대하여도 생기는 것을 나타내어 처음으로 α 의 전영역에 대한 파단

스트레인의 집중이 예상되는 두께가 작은 시험편 왼쪽부분은 특히 작게 요소분할을 하였다.

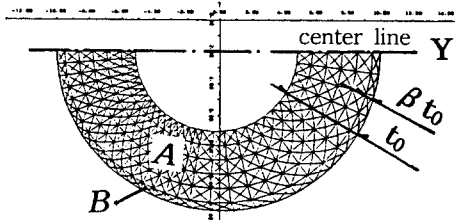


Fig.6 Model of coated cylindrical sheet metals

해석한 코팅재의 재료정수는 Fig.1과 같은 재료로서 B재료의 코팅두께비 β 를 일정하게하고 n 치와 코팅면을 변화시켜 Table 2와 같이 나타내었다.

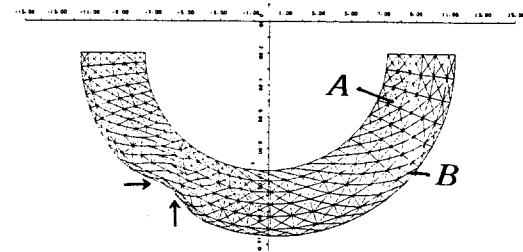
Table 2. B-material constants of coated cylindrical sheet metals

Type	n-value	ρ -value	β	
cylin1	0.01	0.8	0.1	outside
" 2	0.5	0.2	0.1	coating
" 3	0.01	0.8	0.1	innerside
" 4	0.5	0.2	0.1	coating
" 5	0.2	0.5	0.1	"

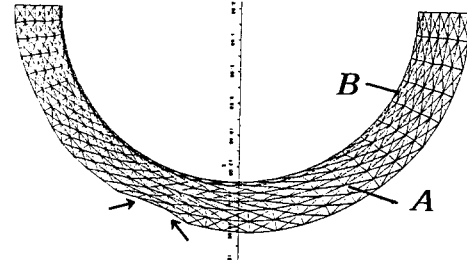
Fig.7은 위재료를 해석한 것 중 외부에 코팅한(cylin1, $n=0.01$)과 내부에 코팅한(cylin4, $n=0.5$)의 전단띠가 형성된 변형양태를 나타냈다. 이 그림에서 보면 전단띠 형성이 모재의 n 치가 0.1보다 적은 (a)의 경우 코팅표층으로부터 2중전단띠가 형성되어 유기되는 것을 볼수 있고, n 치가 모재보다 큰 (b)의 경우 $U/L=0.4$ 까지 안정되게 변형하면서 표피층으로부터 전단띠가 명확히 나타났다. 이것으로 코팅의 영향을 판단할 수 있었다. 지면관계상 이외에 해석하였던 것의 검토결과는 차기에 기술하고 다음의 결론만으로 요약하였다.

5.결 론

금속의 기계적성질 또는 성형성을 개선하기 위한 코팅재에 관하여 주로 전단띠형성을 변형한계라고 하는 것에 의해 변내평면스트레인상태에서의 한계스트레인을 몇가지 경우에 대하여 수치적으로 검토했다. 소성구성식으로 J2G를 이용하여 단순인장, 인장굽힘의 상태를 코팅두께비 또는 n 치의 영향을 조사하고, 불안정변형의 모양과 코팅효과를 검토하여 코팅재의 변형한계를 판정할 수 있는 가능성을 확인하였다.



(a)cylin1($n=0.01$, $U/L=0.1407$)



(b)cylin4($n=0.5$, $U/L=0.4000$)

Fig.7 Appearance of shear band(A-material: $E=70\text{GPa}$, $\nu=0.33$, $\sigma_0 = 10\text{MPa}$, $n=0.1$, $\rho=0.8$)

참 고 문 헌

- ① 加藤俊之 : 塑性と加工, 38-432(1997-1), 35.
- ② Hill, R. : J. Mech. Phys., Solids, 1-1(1952), 19.
- ③ Marciniak, Z. and Kuczynski, k. : Int. J. Mech. Sci., 9-9(1967), 609
- ④ Stören, S. and Rice, J. R. : J. Mech. Phys Solid, 23-6(1975), 421.
- ⑤ 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.
- ⑥ 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.
- ⑦ 後藤學 : 日本機械學會論文(A編), 50-658(1984), 1753.
- ⑧ 後藤學, 三浦篤之, 平子誠 : 塑性と加工, 30-342(1989), 1022.
- ⑨ Gotoh, M. : JSME Int. J., Ser, I, 34-3(1991), 297.
- ⑩ 後藤學, 鄭泰勳 : 日本機械學會論文(A編), 61-592(1995), 2636.
- ⑪ 鄭泰勳, 後藤學 : 日本機械學會論文(A編), 62-594(1996), 569.
- ⑫ Gotoh, M. : Engng. Fracture Mech., 21-4(1985), 673.
- ⑬ 後藤學 : 日本機械學會論文(A編), 54-504(1988), 1579.

지는 것을 알 수 있고 반면에 피복재의 n 치가 모재의 n 치 보다 작을 때(coat2, coat4)에는 피복층이 두꺼울수록 한계스트레인이 작아지는 것을 확인하였다.

Fig.4에서는 피복층의 n 치의 영향을 나타내었다. $n=0.01$ (coat2, coat4)이고 단지 피복층의 두께만 변화시켰을 때는 한계스트레인의 변화는 거의 없으며 $n=0.2$ (coat1, coat3)인 경우에는 두께변화에 따른 한계스트레인의 변화는 적은 상태이며 모재의 n 치가 기준이 되어 코팅피복재의 영향에 의해 성형한계가 변화되는 것을 나타내었다.

이러한 결과는 저자가 전에 발표한 피복층이 두꺼운 접합재의 해석결과와도 일치하였다. 또한 한쪽 피복의 경우와의 비교에 의해 변형양태가 크게 다르며 양측피복의 경우는 외장피복재에 의해 모재의 불안정 변형억제효과가 크다는 것을 확인하였다.

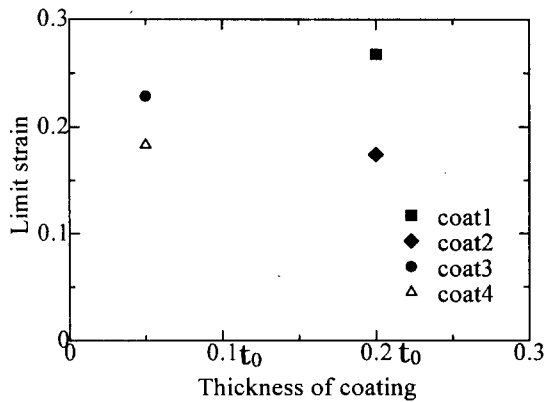


Fig.3 Effect of coating thickness

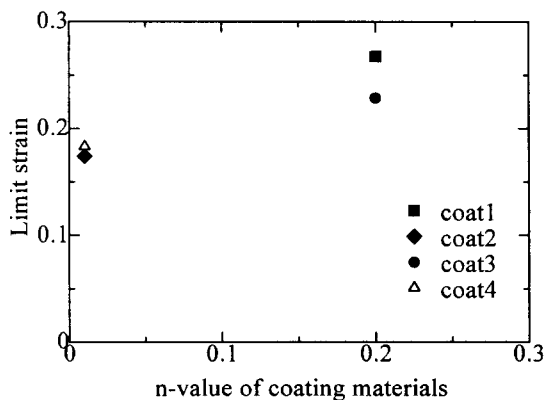


Fig.4 Effect of coating material's n -value

Fig.5는 해석한 코팅재의 중심부 및 표층부 요소의 상당응력과 상당스트레인의 관계를 나타냈다.

그림에서 실선은 중심부 요소의 상당응력과 상당스트레인의 변화상태를 나타내며 점선은 표층부의 상당응력과 상당스트레인의 변화를 나타내었다. 중심부 요소의 응력과 스트레인의 변화는 모든 코팅재가 같은 비율로서 변하며, 또한 표층부에서는 coat1과 coat3, coat2와 coat4재가 같은 비율로서 변하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig.4의 n 치의 영향에 의한 결과와 일치하며, 중심부와 표층부의 차가 인장이 될수록 점점 커지는 것도 알 수 있으며, $n=0.2$ 인 coat1, coat3의 경우에 스트레인이 증가할수록 상당응력도 증가하며, $n=0.01$ 인 coat2, coat4인 경우는 상당응력이 거의 일정하나 상당스트레인의 증가량은 coat2보다 coat4가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 코팅두께(coat2의 코팅두께=0.2 t_0 , coat4의 코팅두께=0.05 t_0)의 영향 때문이다. 즉 피복재의 n 치와 코팅두께의 영향으로 모재의 변형한계가 변하는 것을 수치적으로 예측할 수 있다.

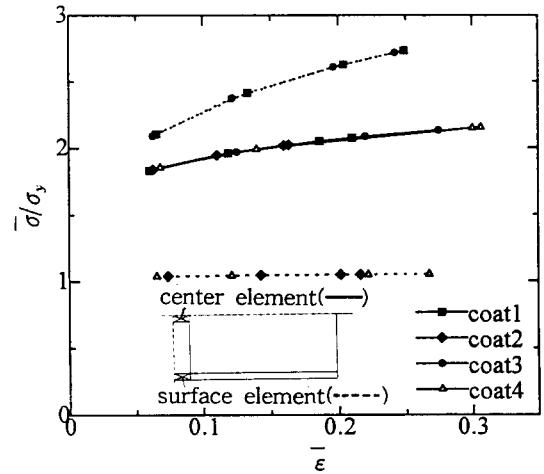


Fig.5. Equivalent stress and equivalent strain in center element and surface element of coated sheet metals.

4. 코팅원통판재의 변형한계

Fig.6과 같은 원통형 모델이 내압을 받아 인장압 힘되는 상태를 평면스트레인 탄소성유한요소법으로 해석하였다. 코팅원통판의 두께를 그림의 왼쪽부분을 전체두께의 0.04% 작게하고, 모재 A재료에 대하여 B(피복재)재료를 전체초기판두께의 β 배로 하여 외부(cylin1, cylin2) 또는 내부면쪽(cylin3, 4, 5)에 코팅을 하였다. 이 경우는 대칭성이므로 1/2만 해석하고, 원주방향으로 1스텝당 변위량을 주어 r-min 방법으로 증분 해석하였다. 그림에서 보는 바와 같이

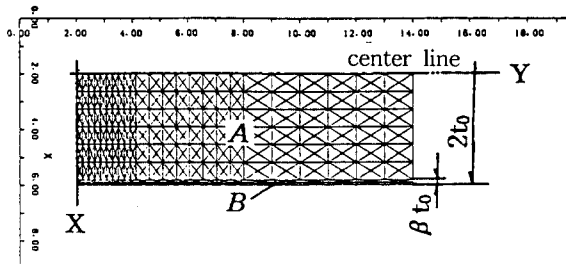


Fig.1 Model of coated sheet metals (plane strain)

해석한 코팅재의 재료정수는 모재인 A가 $E=70\text{GPa}$, $\nu=0.33$, $\sigma_0 = 10\text{MPa}$, $\rho=0.8$, $n=0.1$ 로서 Al상당의 재료에 B재료인 $E=120\text{GPa}$, $\nu=0.34$, $\sigma_0 = 200\text{MPa}$ 의 Cu상당의 재료를 n 치와 코팅 두께비 β 를 변화시켜 Table 1과 같이 나타내었다.

여기서 E 는 영률(GPa), ν 는 프아송비, σ_0 는 초기항복응력(MPa), n 은 가공경화지수, ρ 는 J2G중에서 꼭지점의 성장속도를 규정하는 재료정수이다. 아래에 계산결과를 나타내었다.

Table 1. B-material constants of coated sheet metals

Type	n-value	ρ -value	β
coat 1	0.2	0.2	0.2
" 2	0.01	0.8	0.2
" 3	0.2	0.2	0.05
" 4	0.01	0.8	0.05

Fig.2는 Fig.1의 모델을 사용하여 해석한 재료중 coat3재를 양단구속하여 인장이 진행되는 변형양태를 나타내었다. 그림 중 마크로 표시된 것은 소성상태 요소를 표시하고 있다. U/L 은 신장길이/초기길이이며, ↓는 전단띠가 생기고 있는 부분을 나타낸다. 그림(a)는 초기상태에서 인장되어 신장비가 0.0001이 되어 전요소소가 탄성상태의 요소에서 소성상태의 요소가 점점 확장되어 (b)에서 전요소로 소성영역으로 되는 것을 볼수있으며, (c),(d),(e)처럼 인장이 진행되었다. 인장되고 있는 중 신장비가 0.2287인 (f)를 보면 소성상태에서 탄성상태의 요소가 발생하며 코팅표층방향에서 중심방향으로 전단띠가 생기기 시작하는 것을 볼 수 있으며, 신장비가 0.2599인 (h)를 보면 전단띠가 명확히 생성되어 있는 것을 알 수 있다. 이 그림으로부터 국부백킹내의 전단띠 타입의 스트레인 집중띠가 명확히 발생하고 있다. 해석결과에 의한 변형양태를 보면 피복시킨 B재료

의 n 치가 모재의 n 치보다 큰 경우는 중심부 부터 전단띠가 나타나는 것을 볼 수 있고 표면까지 확산되는 2중띠가 나타났다.

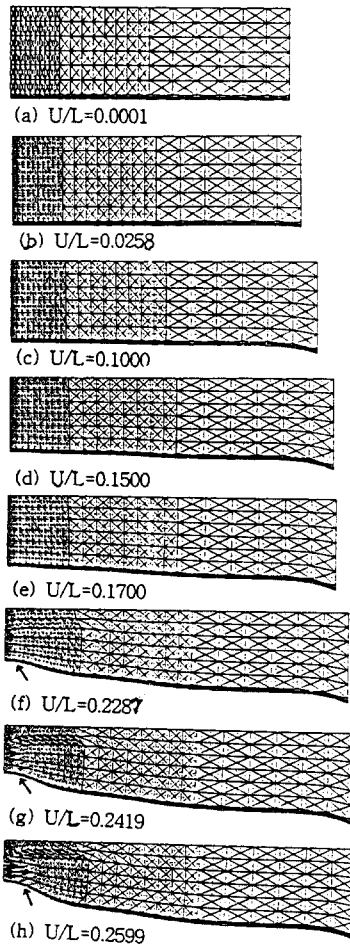


Fig.2 Appearance of shear band(coat3)
(B-material $n=0.2$, $\rho=0.2$, $\beta=0.05$)

Fig.3과 Fig.4는 위의 해석결과 전단띠가 형성되는 시점(성형한계)의 공칭스트레인을 플랫폼하였다. 이상에 있어서 각 계산에서 전체의 증분스텝에 대한 변형형상을 프린트아웃할 수 없기 때문에 임계상태가 정확하게 추출되었다고는 할 수 없다. 위의 데이터도 이런 종류의 오차를 포함하고 있다. Fig.3은 피복층의 두께에 따른 한계스트레인을 나타내었다. 이것을 보면 모재의 n 치가 0.1로 일정하였을 때 피복재의 n 치가 모재의 n 치보다 클 때에는 n 치가 클수록 또한 피복층이 두꺼울수록 한계스트레인도 커

한계 조건을 나타냈다⁽⁴⁾.

국부분기조건은 소성구성식에 대한 의존성이 크기 때문에 따라서 변형이력이 복잡하게 되면 이 판단예측성능은 구성식의 정도에 따라 나쁘게 된다.

宅田은 판재에 압축성을 고려한 소성구성식에 의해 변형해석하여 재료내부의 밀도변화를 추출하여, 이것에 한계치를 설정하는 것으로서 판단예측을 하였고⁽⁵⁾, 또한 3차원 고찰을 한 것으로서 stören & Rice의 이론을 확장한 伊藤의 연구에서는 국부분기가 전단파 이론이 되기 때문에 판재의 판단한계는 평면응력가정하에서의 국부넉킹조건에 의한 경우보다 높게 됨을 나타내었다⁽⁶⁾.

또한 Gotoh는 소성구성식(J2G)을 제안하여 국부분기조건 즉 판단조건을 정하여 실험적 검증에 의해 적어도 실용레벨에서의 유용성을 나타내었다⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾.

이 J2G(J2-Gotoh's corner theory)를 변형의 수치시뮬레이션에 적용하여 이 때의 변형양태의 관찰과 하중의 급락 등과 시뮬레이션의 결과로서 생기는 국부넉킹을 성형한계라고 판정하였다. 그러나 판재의 판단한계의 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 성형한계변형의 판두께 의존성을 검토하였다⁽¹⁰⁾. 성형한계의 판정은 국부넉킹발생 후 두께방향으로 발생하는 전단파(shear band)형성의 시점으로 하고 이러한 소성변형 국소화를 표현하기에 적합한 소성구성식 J2G의 채용에 의해서 수치적 평가가 충분히 가능한 것을 확인하였다⁽¹¹⁾.

본 논문에서는 같은 수법으로 최근 많이 사용되는 코팅재에 대하여 단순인장과 인장급형상태에서 몇 종의 다른 재료를 조합하여 코팅이 전단파 형성의 양태에 미치는 영향과 성형한계에 미치는 영향에 주목하였다. 코팅경계의 박리는 없는 것으로 하였다.

2. 기초이론

먼저 J2G구성식을 기술하면, 단 상세는 문헌을 참조한다^{(12),(13)}. 굵은 문자는 2계 텐서를 나타내고, t , 은 trace의 기호이며 표시는 증분형식이다.

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

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

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

편차, $\dot{d}\mathbf{T} = d\mathbf{T} - d\omega\mathbf{T} + \mathbf{T}d\omega$, $d\omega$ 는 강제회전증분이다. 또한 $1/G^* = 1/G + \langle P \rangle / H_0$, G 는 횡탄성계수, $P(\Theta) = a + b\cos\Theta$, $P > 0$ 에 대하여 $\langle P \rangle = F$, $P \leq 0$ 에 대하여 $\langle P \rangle = 0$ 로서,

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

$$\cos\Theta = t_r(T \dot{d}\mathbf{T}) / [t_r T^2 (t_r \dot{d}\mathbf{T}^2)]^{1/2}, \\ \bar{\sigma} = \sqrt{3/2} (t_r T^2)^{1/2}$$

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

$h_0 = (1/3) \overline{d\sigma} / \overline{d\epsilon}^p$ (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 소성성형에

서는 $70^\circ < \Theta_0 < 90^\circ$ 에서 꼭지점의 발달은 없지만, 이 작은 꼭지점형성이 국부넉킹 등 스트레인집중현상에 크게 기여한다. 위의 이론을 기본으로 하여 기계적성질이 다른 코팅판에 대하여 복합화의 효과를 평면스트레인에 대해서 조사하였다. 이 경우 다음과 같은 가공경화식(n 증경화법칙)을 사용하였다.

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

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

3. 코팅판재의 인장성형한계

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

Fig.1과 같은 모델을 양단 구속을 하고 모재 A재료에 대하여 B(피복재)재료를 전체초기판두께의 β 배로 하여 위 아래 양면쪽에 코팅을 하였다. 이 경우는 대칭성이므로 1/4만 해석한다. 그림에서 보는 바와 같이 스트레인의 집중이 예상되는 시험편 중앙부분은 특히 작게 요소분할을 하였다.