

## 이중복합봉 정수압 압출시 접합면 거동에 관한 연구

박훈재\* · 나경환\* · 조남선\* · 이용신\*\*

(1997년 12월 20일 접수)

### A Bonding Surface Behavior of Bi-metal Bar through Hydrostatic Extrusion

H.J. Park, K.H. Na, N.S. Cho and Y.S. Lee

#### Abstract

The present study is concerned with the hydrostatic extrusion process of copper-clad aluminium bar to investigate the bonding conditions as well as the basic flow characteristics. Considering the bonding mechanism of bi-metal contact surface as cold pressure welding, the normal pressure and the contact surface expansion are selected as process parameters governing the bonding conditions. In this study, the critical normal pressure required for the *local extrusion* - the protrusion of virgin surfaces by the surface expansion at the interface - is obtained using a slip line method and is then used as a criterion for the bonding. A rigid plastic finite element method is used to analyze the steady state extrusion process. The interface profile of bi-metal rod is predicted by tracking the paths of two particles adjacent to interface surface. The contact surface area ratio and the normal pressure along the interface are calculated and compared to the critical normal pressure to check bonding. It is found that the model predictions are generally in good agreement with the experimental observations. The comparisons of the extrusion pressure and interface profile by the finite element method with those by experiments are also given.

**Key Words** : Copper-clad aluminum bar, Hydrostatic extrusion, Contact surface area ratio, Local extrusion, Critical protrusion pressure

#### 1. 서 론

과학기술이 발전하고 산업이 고도화됨에 따라 고부가가치 제품의 수요가 증대되고 있고, 이를 충족시키기 위해서는 복합재, 고강도 합금강 및 특수금속 등 새로운 소재의 개발이 요구된다. 이러한 요구를 어느 정도 만족시켜 줄 수 있는 클래드는 복합소재의 일종으로 분류되며, 어

떤 금속을 동종 또는 이종의 금속으로 그 전면에 걸쳐 피복하고, 서로의 경계면에서 금속조직적으로 접합을 이루고있는 소재로 정의된다. 축대칭의 경계면 접합을 갖는 이중복합소재의 가공을 위한 효과적인 방법으로 정수압을 이용한 압출 공법이 추천된다. 정수압 압출공정은 기밀을 유지하는 용기속의 유체로 둘러싸인 소재가 유체의 압력이 임계점에 도달하였을 때 성형을 수행하는 공정으로 제

\* 한국생산기술연구원 생산기반기술센터

\*\* 국민대학교 기계공학과

품의 기계적성질의 향상 및 난소성 재료의 성형성 해결 등의 장점을 갖춘 공법이다.

정수압 압출 공정중에 행해지는 두 금속간의 접합거동은 소성일 발산에 의한 발열 보다는 접촉압에 의한 국부적 소성변형으로 이루어지는 고상접합에 분류되며 냉간압접에 속한다.<sup>(1,3)</sup> 소성변형에 의한 접합은 접합면에서 새로운 면의 생성정도와 수직압력의 크기가 접합의 성패를 좌우하게 되며, 이는 소성가공공정의 여러 변수들에 따라 결정된다. 본 연구에서는 구리와 알루미늄으로 조합된 이중복합소재를 정수압 압출공정으로 성형하여, 접합 경계면에서의 접합강도를 비롯한 압출재의 특성을 평가하고, 오일러리안 강소성 유한요소법을 이용해 변형특성, 특히 접합경계면에서의 유동이력을 분석하여 접합조건을 규명하고자 한다.

## 2. 이론해석

본 연구의 이론해석은 경계면에서의 접합을 판별하기 위한 조건을 확립하는 이론해석과 이중복합봉재의 정수압 압출공정의 유한요소해석으로 이루어진다.

### 2.1 경계면 접합모델

지금까지 알려진 소성변형에 의한 냉간압접의 지배기구는 다음과 같이 요약되며 Fig. 1에 보여준다.<sup>(1,2,3)</sup>

- (1) 변형에 의한 접합면 표면층의 파단
- (2) 접합면 확장에 따른 절단선 사이에서 새로운 면 노출
- (3) 접합면의 수직압력에 의한 새로운 면들이 밀착
- (4) 증가된 수직압력에 의한 접합

소성변형에 의한 냉간압접에서 접합조건은 접합면의 확장정도와 그 면에 대한 수직압력의 관계로 볼 수 있다. 냉간압접에서 접합면의 확장에 의해 새롭게 생성된 면들의 근접과정은 미시적인 관점에서 또 다른 소성변형으로 간주될 수 있다. 이 과정에서 소성변형에 따른 접촉면상의 취성막이 접촉면의 변형경로에 따라 원주방향으로 균일하게 파괴된다고 가정하면, 이들 파괴면 사이에서 신생면의 국부압출(local extrusion)은 평균적으로 컨테이너의 벽면마찰이 없는 평면 압출공정으로 근사화 할 수 있으며, 파괴된 취성막들은 마찰이 매우 큰 금형역할을 한다. 본 연구에서는 이중재 경계면의 국부압출해석에서 필요한 신생면의 생성정도를 정량화하기 위하여 접촉면적비(ratio of contact surface area)를 도입한다. 접촉면적비는 미소접촉면적에 대한 변형후와 변형전의 비율( $SR = S_f / S_0$ )이다. 여기서  $S_0$ 는 변형전의 접촉면적,  $S_f$ 는 변형후의 접촉

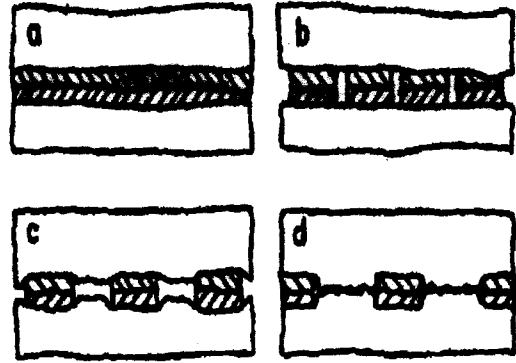


Fig. 1 Schematic outline of the bonding mechanism in cold pressure welding:

- (a) Fracture of brittle surface layers, (b) Surface expansion increasing the area of virgin surface, (c) Extrusion of virgin material through cracks of the original surface layer, (d) Establishment of real contact and bonding between virgin material

면적을 나타낸다.

국부 압출에서 임계압출압력을 구하는 방법으로 본 연구에서는 해석적인 방법으로 비교적 용이하게 구할 수 있는 미끄럼선장법(slip line field method)을 선정하였으며, 마찰이 매우 큰 평금형을 통한 간접 평면 압출 공정에서 접촉면적비와 임계압출압력( $p$ )와의 관계는 Hill<sup>(4)</sup>의 결과를 이용하여, Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 경계면에 형성된 산화막의 두께는 수  $\mu\text{m}$ 에서 수 십  $\mu\text{m}$ 에 불과하므로, 경계면상에서 국부평면압출은 극히 변형량이 작은 국부적인 미세변형으로 간주할 수 있으며, 이 미세압출공정 중의 가공경화는 무시하여 초기의 전단항복응력( $k$ )만을 고려한다. 한편 정수압 압출공정에서 변형경로를 따른 접촉경계면의 가공경화를 고려하기 위해서는 이 초기항복응

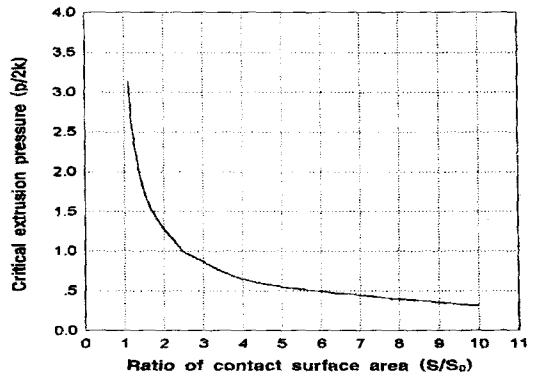


Fig. 2 Relationship between critical extrusion pressure and ratio of contact surface area

력(2k)을 접촉경계면을 따른 각 지점의 유동응력으로 대치하며, 이 값들은 접촉면적비와 더불어 다음절에서 주어지는 공정해석모델을 이용하여 접촉경계면을 따라 구한다.

## 2.2 공정해석모델

가공소재의 변형경화성 점소성 변형은 상태변수모델로 묘사하였고, 오일러리안 검사체적 내에서의 상태변수변화는 유선적분법으로 예측한다. 이중소재 경계면 거동을 예측하기 위해 경계면 수정 알고리즘을 이용하며, 경계면을 따른 표면의 확장정도를 계산하고 이에 따른 생성 면들의 밀착압력을 예측한다.

소성가공중인 금속은 대개 변형경화성과 변형률속도의존성을 모두 갖고 있으며 미세조직의 변화에 따라 변형재의 특성도 변한다. 이에 미세조직의 변화에 따른 기계적 성질의 변화를 반영하도록 상태변수모델이 제시되어 왔으며, 스킨과 상태변수모델의 경우에는 변형경화성의 정도를 상태변수로 나타낸다. 본 연구에서 이용한 상태변수모델은 Hart<sup>(5)</sup>에 의해 제시되었고 Dawson<sup>(6)</sup> 등에 의해 간략화 된 모델이다. 간략화 된 Hart모델에서 상태변수는 하드니스로 지칭되고 있으며, 전위의 국부적 밀도를 수학적으로 표현한 것이다.

접합기구의 해석을 위해 비교적 정확한 압력분포의 예측이 요구된다. 따라서 본 해석에서는 속도와 압력분포에 비교적 좋은 결과를 주는 상응벌칙유한요소법(Consistent penalty finite element method)를 이용하였다. CPFEM에서는 속도와 압력이 형상함수(shape function)을 이용하여 각 요소 내에서 연속인 근사 식으로 표현되나, 압력항은 각 요소의 유한요소정식화 이후 소거되어 전 영역에서 조합된다. 따라서 최종에는 속도만을 미지수로 해를 구하고 압력은 후처리 과정에서 구해진다. 본 연구에서 사용하는 상응벌칙유한요소법의 상세한 전개는 참고문헌(7)에 주어진다.

유선적분법에서는 오일러리안 검사체적 내에서 물질의 유동경로를 찾고, 그 유선을 따라 상태변수 발전식을 적분하여 상태변수의 분포를 구한다. 유선적분법은 참고문헌(8)에 상세히 소개된다.

## 2.3 접촉면 변형이력

### 2.3.1 경계면수정

변형중인 이중소재의 올바른 경계면은 오일러리안 검사체적 입구에서 접촉부 근처에서 입자의 유동경로를 추적하여 예측한다. 오일러리안 검사체적 내에 있는 임의의 입

자유동경로의 위치는 현재위치에 대한 Taylor급수 전개로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}^{t+\Delta t} = \mathbf{x}^t + \frac{\partial \mathbf{x}^t}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial^2 \mathbf{x}^t}{\partial t^2} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \quad (1)$$

윗식에서  $\mathbf{x}^{t+\Delta t}$ 와  $\mathbf{x}^t$ 는 각각 입자의 시간  $t + \Delta t$ 와  $t$ 에서의 위치벡터이고, 시간중분  $\Delta t$ 는 유선상의 거리를 입자속도크기로 나누어 구한다. 따라서 식(1)은 시간중분  $\Delta t$ 의 고차항을 무시한 후 입자의 속도벡터와 시간  $\Delta t$  동안의 유선상의 거리로 다음과 같이 근사화한다.

$$\mathbf{x}^{t+\Delta t} \cong \mathbf{u}^t \left( \frac{\Delta |\mathbf{x}^t|}{|\mathbf{u}^t|} \right) + \frac{1}{2} \mathbf{u}^t \cdot \nabla \mathbf{u}^t \left( \frac{\Delta |\mathbf{x}^t|}{|\mathbf{u}^t|} \right)^2 \quad (2)$$

실제의 공정에서는 경계면을 가로질러 물질의 유동이 없어야 하므로 (2)식으로 구한 경로가 처음에 가정한 경계면을 가로질러 들어가면 입자의 유동경로와 가정한 경계면과의 편차로부터 물질의 유동이 없는 수정된 경계면을 구하고 그에 따른 유한요소격자를 새로 만들어 수렴된 해를 얻을 때까지 반복된다.

### 2.3.2 접촉면을 따른 변형이력

이중소재의 접촉경계면에서 변형특성을 알기 위해서 접촉면의 유동경로에 따라 변형이력을 추적한다. 이를 위해 앞절에서 구한 접촉면의 유동경로를 따라 변형구배텐서(F)의 변화를 계산한다. 임의의 시간에서 변형구배텐서(F)는 식(3)으로 표현되고, L과  $\mathbf{u}_c$ 는 각각 속도구배텐서와 속도벡터이다.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^t &= \int_0^t \dot{\mathbf{F}} dt \\ &= \int_{L_c} \mathbf{L} \mathbf{F} \frac{dx_c}{|\mathbf{u}_c|} \end{aligned} \quad (3)$$

윗 식에서 시간에 따른 적분은 오일러리안 검사체적 내의 변형경로( $L_c$ )에 따른 적분으로 변환 되었다. 한편 초기치에 해당하는 오일러리안 검사체적 입구에서의 변형구배텐서는 등각텐서(Identity tensor)이며, (3)식의 적분은 앞 절에서 구한 접촉면경로를 따라 수행한다. 접촉면 경로의 하류점  $\mathbf{x}^{t+\Delta t}$ 에서의 변형구배 텐서 즉 시간  $t + \Delta t$ 에서 변형구배텐서 ( $\mathbf{F}^{t+\Delta t}$ )는 Crank-Nikolson 법을 이용해 구한다.

$$F^{t+\Delta t} = (I - \frac{\Delta t}{2} F^{t+\Delta t})^{-1} (I - \frac{\Delta t}{2} L') F^t \quad (4)$$

일단 변형구배텐서를 알면 변형률텐서를 비롯한 모든 변형이력의 계산이 가능하다. (4)식을 이용하여 경계면의 모든 위치에서 변형구배텐서를 구하고 이로부터 진변형률(logarithmic strain)을 구한다. 오일러리안 해석에서 검사체적내의 물질유동은 현재의 형상에서 정의되는 것이므로 임의의 지점에서 변형률계산은 Left Cauchy Green 변형률텐서 ( $B = FF^T$ )를 이용하는 것이 편리하다.<sup>(9)</sup> 이 경우에 다음의 특성방정식을 만족시키는 고유치(eigen value)해석이 요구된다.

$$[B - \alpha_i I] m^i = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

$$\det(B - \alpha_i I) = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

일단 접촉면 경로의 임의 점에서 Left Cauchy green tensor의 고유치 쌍(eigen pair)를 구하면, 그 점에서의 주인장도(principal stretch)와 접촉면적비를 구할 수 있다. 최종적으로는 접촉면적비와 공정해석에서 구한 그 지점의 정수압 압력을 바탕으로 경계면 접합여부를 판단할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

정수압 압출실험은 생산기술연구원에서 실험연구용으로 개발한 1.5MN급의 수평식 정수압 압출기를 이용하였다. 본 압출기는 컨테이너의 수명과 안전성을 높이기 위해 특수하게 고안되었고, 이중으로 된 라이너의 외벽에 피아노 강선을 감아 보강하는 강선적층방식으로 설계·제작되었다. 본 압출기는 0~25 mm/sec까지 램의 속도를 변화시킬 수 있으며, 램의 변위와 속도를 측정할 수 있는 LVDT와 압출하중을 측정할 수 있는 로드셀을 갖추고 있다.

#### 3.2 실험

압출시편은 안쪽의 심재로는 냉간에서 비교적 큰 압출비를 얻기 위해 연성과 전성이 우수한 알루미늄봉(commercially pure)과 바깥쪽의 클래드재로는 구리봉(OFE copper)을 사용하였으며 실험조건은 표 1과 같다. 복합재의 압출에서는 시편 제작시에 표면의 불순물들을 제거하는 표면처리공정이 매우 중요시된다. 또한 심재와 클래드재의 표면거칠기값이 비슷한 수준을 유지하도록 하여 압

출공정시에 경계표면층의 균일한 파괴를 유도하였다. Fig. 3에서 실험에 사용된 금형과 압출제품을 보여준다.

Table 1 Extrusion condition

시편 크기		금형 직경 (mm)	금형 반각 (°)	압출비	실험 온도
Cu	Al				
φ30×1.00t	φ28.0	20	22.5	2.250	상온
φ30×2.00t	φ26.0	15	30	3.114	
φ30×3.00t	φ24.0	10	40	4.000	
φ30×4.00t	φ22.0	8		6.250	
				9.000	

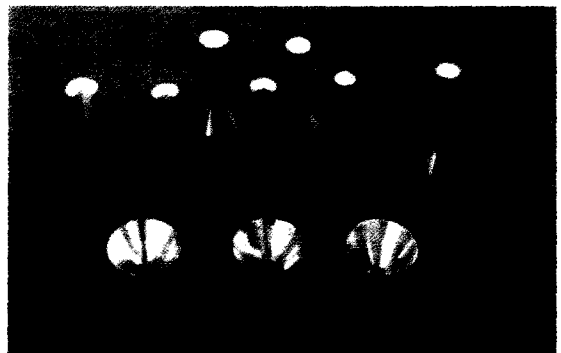


Fig. 3 Dies and extruded products

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 접촉경계면의 수정

접합면의 접합공정변수로 경계면에서의 접촉면적비와 경계면 임계압출압력을 설정하였다. 신뢰할 수 있는 이들 공정변수들을 얻기 위해서는 우선 실제 정수압 압출공정과 유사한 변형유형으로 해석이 수행되어야 하므로, 해석의 타당성을 검토하기 위해 경계면의 유동경로를 비교하였다. 축대칭 압출시편은 NC밀링으로 중간면까지 정밀 가공하여 profile projector에서 축방향으로 1 mm간격으로 측정하였다. 압출비(ER) 및 압출금형반각의 변화에 따라 측정된 압출하중 값을 경계면수정을 통해 얻은 이론해석값과 비교한 결과가 Fig. 4에 보여진다. 모든 경우에서 최대 편차범위는 5% 이내로 일치함을 확인 할 수 있다.

#### 4.2 정수압 압출압력

압출비와 압출금형의 원추각도에 대한 압출압력은 Fig. 5에 나타내었다. 일 회외 정수압 압출공정시 압출압력의

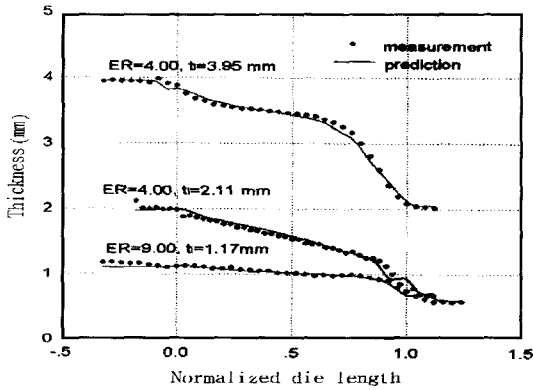


Fig. 4 Comparison of outer layer thickness

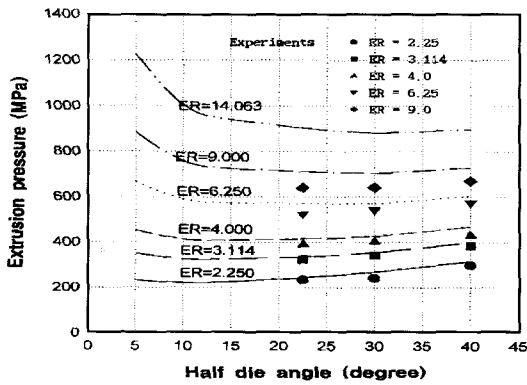


Fig. 5 Extrusion pressure

변화는 공정초기에 최대값을 갖고 이후 정상상태로 진행되는 전형을 갖는다. 압출압력은 압출비가 커짐에 따라 증가하며, 일정한 압출비에서 압출압력을 최소화하는 금형 각도가 존재함을 볼 수 있다. 몇 종류의 압출비와 금형각에 대해 압출실험을 수행하여 해석값과 비교한 결과 10% 이내에서 정량적으로 일치하는 것을 Fig. 5로부터 확인할 수 있다.

#### 4.3 접합면에서의 수직압력과 생성면의 임계압출압력

Fig. 6은 압출비가 4.000, 금형반각이 30°에서 경계면의 반경( $R_c$ )을 초기시편의 외경( $R_o$ )을 기준으로 0.933, 0.867, 0.800 및 0.733에 두었을 때 경계면에서의 수직압력( $p_a$ )과 생성표면들간의 밀착에 소요되는 임계압출압력( $p_c$ )의 비를 유동경로를 따라 보여준다. 수직압력의 크기는 생성면의 임계압출압력에 미치지 못하며, 외재의 두께가 증가함에 따라 경계면에 작용하는 수직압력도 증가

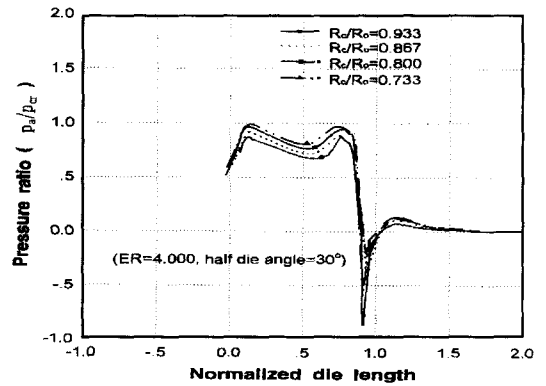


Fig. 6 Comparison of normal pressure and critical protrusion pressure

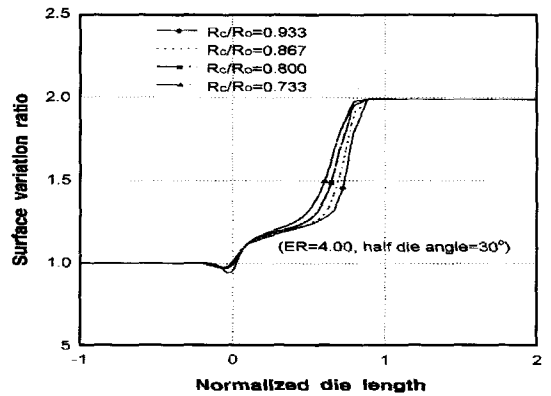


Fig. 7 Variations of surface ratio for different contact position

하는 경향을 나타낸다. 그 이유는 Fig. 7에서와 같이 경계면이 중심쪽에 위치할수록 변형경로의 전반부에 표면비가 커져 임계압출압이 작게 소요되는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 8에서는 일정한 압출각과 외재두께에서 압출비에 따른 수직압력과 임계압출압력과의 비를 유동경로를 따라 보여준다. 압출비가 9.00 근처에서 작용하는 수직압력이 생성면의 임계압출압력보다 커져 생성면들사이에서 밀착이 시작됨을 알 수 있다.

Fig. 9에서는 압출비와 외재의 두께가 일정할 때 압출각에 따른 수직압력과 임계압출압력과의 비를 보여준다. 압출각이 커질수록 변형구간에서 작용압력이 임계압출압력보다 작게되는 경향을 볼 수 있는데 이는 변형경로를 따른 접촉면적비는 거의 같은 값을 가지지만, 유동용력은 압출각이 커질수록 증가하여 이로 인해 임계압출압력이 증가한다고 볼 수 있다.

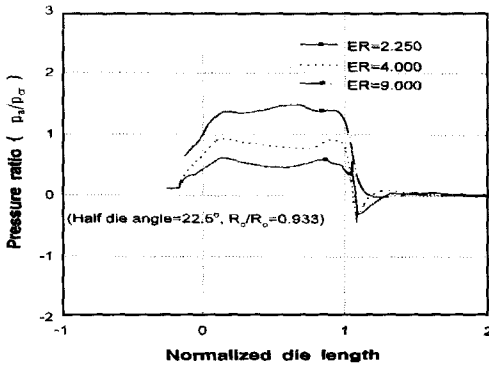


Fig. 8 Comparisons of normal pressure and critical protrusion pressure for some extrusion ratios

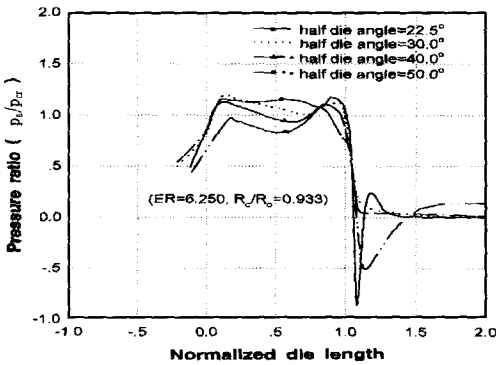


Fig. 9 Variation of critical protrusion pressure

### 5. 결론

구리-클래드 알루미늄 봉재의 제조를 위한 정수압 압출 실험을 수행하고, 경계면에서의 접합거동을 이해하기 위해 Hart모델에 기초를 둔 Eulerian 강소성 유한요소법을 이용한 이론해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정수압 압출 실험결과 공정의 특성상 복합빌렛은 접촉면에서 속도차이를 갖지 않아 압출 전의 빌렛단면비는 압출 후에도 보전된다.

(2) 경계면 수정 알고리즘으로 경계면에서 입자의 유동 경로를 예측하여 계산한 바깥쪽 구리의 두께변화를 실험값과 비교하여 정량적으로 일치함을 확인하고, 압출하중을 압출비의 변화에 따라 측정하여 소성이론해석 결과와 비교한 결과 10% 이내로 근접하는 경향을 확인하여, 이론해석의 유효성을 입증하였다.

(3) 경계면에서의 접합변수를 수직압력과 접촉면적비

로 선정하였으며, 경계면에서의 접촉면적비에 따른 임계 압출압력을 도입하여 접합가능성을 판별하였다.

(4) 압출비가 증가하면 경계면에서의 수직압력과 임계 압출압력과의 차가 커지게 되는 것을 확인하였으며, 이 때의 압력차는 접합을 위한 순수한 수직압력으로 작용한다.

(5) 접합면이 시편의 중심쪽으로 위치할수록 임계압출 압력이 작아져 접합이 이루어질 확률은 커지며, 압출각이 커지면 반대현상으로 나타난다.

### 참고문헌

- (1) Bay, N. 1979, "Cold pressure welding-The Mechanisms Governing Bonding", Journal of Engineering for Industry, Vol.101, 121~127.
- (2) Zhang, W., Bay, N. 1990, "Alternative Methods of Surface Preparation in Cold Rolling Bonding", Final Report Danish Technical Research Council, Jr. No. 16~4156. M
- (3) Zhang, W., Bay, N. 1992, "Influence of Hydrostatic Pressure in Cold-Pressure Welding", Annals of the CIRP, Vol.41/1, 293~297.
- (4) Hill, R. 1960, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, pp.182~186.
- (5) Hart, E.W. 1975, "Constitutive Relations for the Non-Elastic Deformation of Metals", General Electric Company Corporate Research and Development.
- (6) Lee, Y.S. and Dawson, P.R. 1989, "Obtaining residual stresses in metal forming after neglecting elasticity on loading", ASME Journal of Applied-Mechanics, Vol. 111, 318.
- (7) Lee, Y.S. and Dawson, P.R. and Dewhurst, T.B. 1990, "Bulge predictions in steady state bar rolling processes", IJNME, Vol. 30, pp. 1403~1413.
- (8) Lee, Y.S. and Hahm, S-Y 1997, "Mechanical Property Changes in Drawing/ Extrusion of Hardening Viscoplastic Materials with Damage", Int. J. Mech. Sci., Vol. 39, No. 5, pp. 565~573.
- (9) Malvern, L.E. 1969, "Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium", Prentice-Hall, 154~170.