

급속응고 Al-Si합금의 압출가공에 대한 유한요소해석

김의석 · 천병선 · 김형섭

충남대학교 금속공학과 및 급속응고 신소재연구소

Finite Element Analysis for Extrusion of Rapidly Solidified Al-Si Alloys

Eui-Seok Kim, Byong-Sun Chun and Hyoung-Seop Kim

Department of Metallurgical Engineering and RASOM Center,
Chungnam National University, Yuseong-gu, Taejeon, 305-764, Korea

(Received October 30, 1996)

ABSTRACT Investigation on the extrusion of rapidly solidified Al-Si alloys was performed in order to develop an inexpensive production process of high strength parts. It is necessary to establish optimum process variables for the extruding condition through the experiments, because it is high cost and time consuming process. In this paper, the experimental results was compared to the finite element analysis for the extrusion of rapidly solidified Al-Si alloys. The results of this simulation helped to understand the distribution of relative density and effective stress for rapidly solidified Al-Si alloys during the extrusion process. This information is expected to assist in improving the extrusion operations of rapidly solidified Al-Si alloys.

1. 서 론

분말재료를 사용하여 부품 또는 소재를 제조하는 분말가공분야중 분말 압출가공은 단일 공정에 의해 이론밀도까지의 성형이 가능하고 고온등압성형법(HIP)보다 낮은 성형온도에서 완전치밀화가 가능하므로 분말을 성형하였을 경우, 우수한 기계적 성질을 나타낼 뿐만 아니라 대량생산에도 유리한 이점이 있다."

분말압출에 영향을 미치는 요인으로는 합금조성, 다이스구조, 압출온도, 압출압력, 압출속도등을 들 수 있다. 특별히 소재가 분말재이므로 기공의 치밀화, 입자의 조밀화 및 압출 성형이 동시에 이루어지는 공정으로, 압출가공 특성은 응력분포에 따른 밀도분포가 최종제품에 결정적인 영향을 미치므로 분말압출가공 과정의 응력해석 및 밀도분포 해석이 필수적이다.

가공 공정을 정확히 해석하기 위해서는 각 변수를 조절해 가면서 실험을 반복할 수도 있으나, 이론적인 해석이 가능하다면 훨씬 경제적이고, 정량적인 접근

이 보다 쉬워진다. 분말 성형체의 변형거동을 이론적으로 해석하기 위해서는 각각 분말입자의 변형특성과 분말과 분말사이의 미시적인 상호작용들, 확률과 통계 이론을 이용하여 거시적인 연속체 역학과 관련시키는 수학적 모델이 필요하다. 그러나 이런 접근법은 너무나 복잡하여 계산량이 엄청날 것이며 확립된 이론도 없다. 그러나 1970년대 이후 거시적 수준의 현상학적 접근법인 연속체역학을 이용한 해석법이 많이 연구되고 있다. 최근 소성이론에 바탕을 두고, 기공이 없는 금속의 소성변형해석에 사용되는 슬래브해석법(slab method)¹⁾, 슬립선장이론(slipline field method)²⁾, 상계해석법(upper bound method)³⁾, 유한요소법(finite element method)⁴⁾등 여러 가지 이론들이 시도되어 왔으나 모두 제한된 정보만을 얻을 수 있으며 특히 국부적인 결함과 기계적 성질을 예측하는데 중요한 국부응력과 변형 상태에 대한 정확한 정보를 제공해 주지 못하므로, 최근 컴퓨터의 발달로 금속성형공정에서의 성형하중, 기하학적 형상변화, 금속유동에측 및 최적공정조건을 예측하는데 유용하게 적용되는 유한요소법(finite element method)의 사용이

요구된다.

따라서, 본 연구에서는 최근에 그 유용성이 인정되고 있는 범용 유한요소법(finite element method) 코드인 ABAQUS에 보다 정확한 분말거동을 묘사할 수 있는 Lee-Kim 항복식¹⁶⁾을 사용자정의 서브루틴으로 적용하여 급속응고된 Al-Si합금분말의 압출가공을 해석한 후, 실제 급속응고된 Al-Si분말을 이용한 가공공정의 실험결과와 비교, 분석함으로써 해석의 타당성을 검증하고, 그에 따른 문제점을 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

급속응고 가스분무법에 의해 제조된 Al-20Si-2Cr 분말(105~130 μm)을 350톤 압축기로 상대밀도가 0.8이 되도록 압축하였다. 소성변형량을 조사하기 위해서 시편을 양분하여 격자를 구성하였다. 격자구성 방법으로는 진밀도급속에서는 주로 포토에칭(photo etching), 전기화학적에칭(electrochemical etching) 등이 많이 쓰이나 분말 압분체는 재료내의 기공에 부식용액등이 흡수되므로, 본 실험에서는 두께 0.5 mm의 구리실선을 이용하여 5×5 mm 간격으로 격자를 구성하였다. 압출은 급형다이각이 α=60°인 공정부수를 가진 내부가열(350°C), 수직식압출을 시행하였으며, 이때의 램속도는 13 cm/min이었고, 압출비는 10:1이었다.

압출공정을 3/4 진행한 후 시편을 꺼내어 다시 양분해서 격자의 변형을 관찰하였으며, 미소 비커스 경도기를 이용하여 국부적인 경도분포를 측정하였다.

3. 계산방법

상대밀도가 100%인 재료의 소성변형에 대해서는 Von Mises 나 Tresca 항복조건을 사용하는데 이러한 재료의 항복에는 정수압 응력의 영향이 없으며, 소성 변형중에 부피의 변화가 없다. 반면에 분말재료의 항복은 정수압응력의 영향을 받으며 부피의 변화를 동반한다. 그러므로 분말재료의 항복조건에는 정수압 응력항이 포함되어야한다. 일반적으로 다공질금속의 항복함수는 전단변형과 부피변형항을 모두 포함하는 다음과 같은 식을 갖는다.

$$AJ + BJ_1^2 = Y_R^2 = \eta Y_0^2 \quad (1)$$

A, B와 η는 상대밀도의 함수로 표시되고 J₂은 편차응력의 제2불변량이며, J₁은 응력의 제1불변량이다. 또한 Y_R은 분말재료의 겉보기 항복응력이고 Y₀는 기지급속의 항복응력이다. 위 항복조건은 정수압 응력의 영향을 포함하고 있고, 대칭성(등방성 조건 J₃=0) 및 항복곡면의 볼록조건을 만족한다. 위 식에서 Y^{*}을 분말재료의 인장 또는 압축 항복응력으로 정의한다면

$$J_2' = \frac{1}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}' = \frac{1}{6} [(\sigma_{11}' - \sigma_{22}')^2 + (\sigma_{22}' - \sigma_{33}')^2 + (\sigma_{33}' - \sigma_{11}')^2] + \sigma_{12}'^2 + \sigma_{23}'^2 + \sigma_{31}'^2 \quad (2)$$

$$J_1 = \sigma_{ii}' = \sigma_{11}' + \sigma_{22}' + \sigma_{33}' \quad (3)$$

와 같다.

A, B, η와 상대밀도 R를 관계 맺으려는 제안이 많이 되고 있다. Gurson¹⁷⁾은 완전강소성 재료 내에 하나의 구형공극이 존재한 경우를 가정하여 상계해석으로부터 아래의 항복식을 유도하였다. 이 중공구 모델은 분말성형체의 해석과 연성파괴의 해석에 널리 쓰인다.

$$J_2' + \frac{2Y_0^2}{3} (1-R) \cosh\left[\frac{J_1}{2Y_0}\right] = \frac{Y_0^2}{3} [1 + (1-R)^2] \quad (4)$$

Tvergaard¹⁸⁾은 Gurson의 식을 다음과 같이 수정하였다.

$$J_2' + \frac{2q_1}{3} Y_0^2 (1-R) \cosh\left(q_2 \frac{J_1}{2Y_0}\right) = Y_0^2 [1 + q_3 (1-R)^2] \quad (5)$$

q₁=1.5, q₂=1, q₃=q₁²이다. 만일 q₁=q₂=q₃=1이면 식 (5)는 식 (4)가된다.

Doraivelu 등¹⁹⁾은 일축응력 상태의 항복조건으로부터 A와 B사이의 관계를 구하였다. 즉 1축응력상태에서 식 (1)은 아래와 같이 된다.

$$\frac{A}{3} \sigma_{11}^2 + B \sigma_{11}^2 = Y_R^2 \quad (6)$$

항복상태에서는 Y_R=σ₁₁

$$A=3(1-B) \quad (7)$$

이 얻어진다. Doraivelu등은 식 (7)과 알루미늄 합금의 실험 결과로부터 아래의 식을 제안하였다.

$$(2 + R^2)J_2' + \frac{1 - R^2}{3} J_1'^2 = (2R^2 -)Y_0^2 \quad (8)$$

Lee와 Kim¹⁰⁾은 Doraivelu 등에 의해 제안된 항복식을 수정하여 항복응력과 초기 상대밀도와의 관계로부터 얻은 하나의 상수를 가지는 다음과 같은 항복함수를 제안하였다.

$$(2 + R^2)J_2' + \frac{1 - R^2}{3} J_1'^2 = \left[\frac{R - R_c}{1 - R_c} \right]^2 Y_0^2 \quad (9)$$

여기서 R_c는 실험으로 구한 상수로서 다공질 금속의 항복강도가 0이 되는 임계상대밀도를 의미한다. 즉, R=R_c에서 Y_R=0이 된다. 일반금속에서는 R=1이고 Y_R=Y₀이므로 식 (9)는 Von Mises 항복조건이 된다. 다공질 금속이 조합유동법칙 식 (10)를 만족한다고 가정하면, 탄소성 응력-변형률 관계식은 식 (11)와 같다.

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{q C^E d\varepsilon}{pq + q C^E q} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (10)$$

$$d\sigma = C^E (d\varepsilon - d\varepsilon^p) = C_R^{EP} d\varepsilon = \left[C^E - \frac{C^E q (C^E q)^T}{pq + q C^E q} \right] d\varepsilon \quad (11)$$

여기서 ε^p는 소성변형률, C^E는 탄성 응력-변형률 행렬, C_R^{EP}은 밀도에 의존하는 탄소성 응력-변형률 행렬이다. 탄성 응력-변형률 행렬 C^E는 다음과 같이 표현된다.

$$C^E = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1-\nu) \end{bmatrix} \quad (12)$$

p와 q는 항복함수 F의 함수로서 다음과 같다.

$$p_{ij} = - \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{ij}^p} = \eta H \sigma_{ij}$$

$$q_{ij} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = A \sigma_{ij} + \frac{2}{3} B \sigma_m \delta_{ij} \quad (13)$$

$$H = \frac{2}{3} \frac{EE_i}{E - E_i}$$

여기서 E는 탄성계수, E_i는 선형경화계수, δ_{ij}는 Dirac delta 함수이다.

일반 금속이 소성 변형시 부피가 일정함에 반해, 다공질 금속은 부피가 변한다. 그러나 질량은 보존되므로 이를 이용하면 밀도 변화식을 구할 수 있다.

$$R_0 l_1 l_2 l_3 = R (l_1 + \Delta l_1)(l_2 + \Delta l_2)(l_3 + \Delta l_3) \quad (14)$$

$$R = R_0 \frac{l_1}{l_1 + \Delta l_1} \frac{l_2}{l_2 + \Delta l_2} \frac{l_3}{l_3 + \Delta l_3} = R_0 e^{-(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})} \quad (15)$$

여기서 R₀은 초기 상대밀도, l은 초기 길이, Δl은 길이 증분이다. 식 (15)는 다른 연구¹⁰⁾에서 사용한 아래의 증분 근사식 (16)에 비해 약간의 오차를 줄일 수 있다.

$$R \approx R_{i-1} (1 - \Delta\varepsilon_{11} - \Delta\varepsilon_{22} - \Delta\varepsilon_{33}) \quad (16)$$

여기서 R_i는 전 단계 변형 시의 상대밀도이다.

본 연구에서는 구성방정식들인 식 (10), (11), (12) 및 (13)등을 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS의 사용자 서브루틴 UMAT¹¹⁾에 적용하여 분말 압출공정을 해석하였다. 실험결과와의 비교를 위하여 가스분무법으로 금속응고된 Al-20Si-2Cr의 기계적 성질을 측정하여 사용하였으며 측정된 값은 아래와 같다.

- σ=442.3 ε^{0.15}
- 탄성계수(K)=58 GPa
- 항복응력(σ_y)=271 MPa
- 포아송비(ν)=0.3

또한, 축대칭이 성립되는 공정이므로 1/2만 해석하였으며, 내부가열을 가정하여 다이와 시편과의 열 교환이 없는 등온해석하였다. 수렴한계는 변위와 힘의 곱인 에너지 노름(norm)으로 0.001 이하로 하였다. 각 단계에서 10번 이내의 반복을 수렴하였고, 총 계산시간은 30분정도 소요되었다.

4. 결과 및 고찰

그림 1은 시간경과에 따른 밀도분포를 나타낸다.

초기밀도 0.8에서 시간이 지남에 따라 다이 각진 부분과 시편중심부를 중심으로 치밀화가 진행되어 감을 알 수 있다. (b)에서 알 수 있듯이 분말의 치밀화는 다이안에서 이미 완료된다. 최종단계(c)에 이르

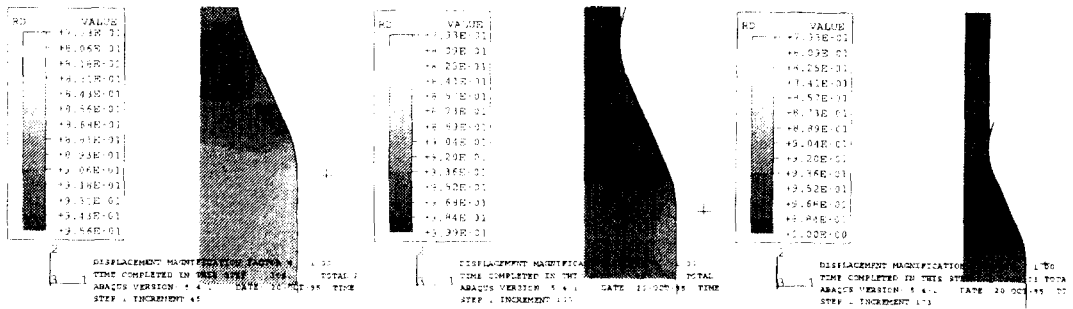


Fig. 1. Calculated relative density distribution for rapidly solidified Al-Si extrudate.
 a)Initial state b)Intermediate state c)Final state

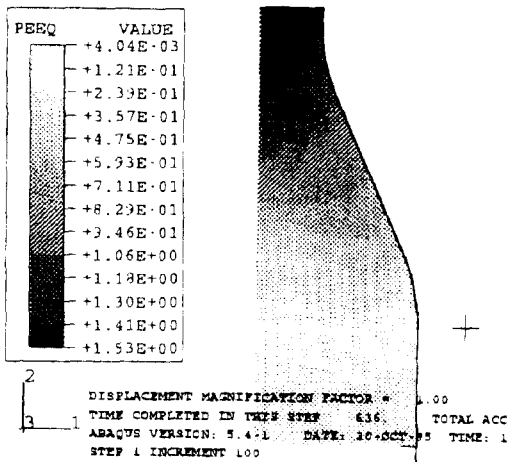


Fig. 2. Calculated effective strain distribution for rapidly solidified Al-Si extrudate.



Fig. 4. Macrostructure for metal flow of rapidly solidified Al-Si extrudate.

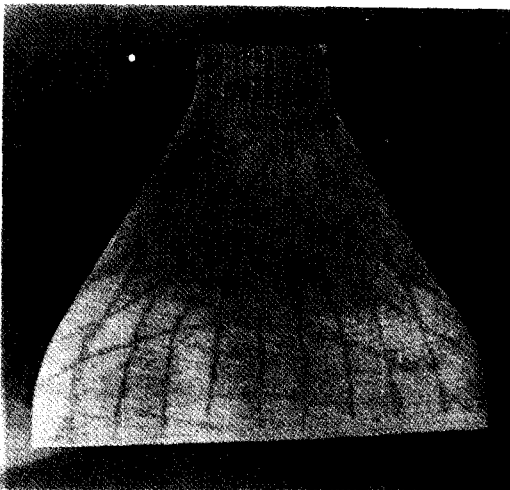
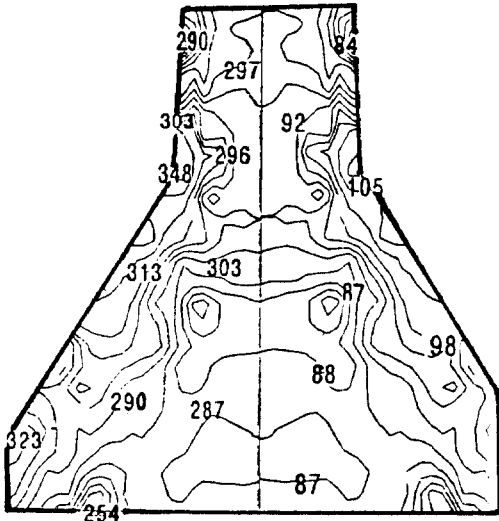


Fig. 3. Extrusion flow patterns of rapidly solidified Al-Si extrudate.

러서는 압분재지편과 램. 다이와의 마찰로 인한 램부분의 국부적인 밀도 불균일 현상을 제외한 모든 부분에서 전밀도에 이르렀음을 보여준다. 이는 지편내부에 혼재하는 기공의 완전한 압착을 의미하므로 다이의 각진 부분과 지편중심부를 중심으로 기공 압착을 지배하는 위치인 기공주위의 유효변형률과 정수압응력의 압축성분이 크게 작용하였음을 의미한다.

그림 2는 그림 1의 (b)와 같은 시간에서의 유효변형률 분포를 나타낸다. 다이 입구를 통과하는 밀렛의 중심부와 다이 입구를 중심으로 가장 큰 변형률이 발생하는데, 이는 그림 1 (b)의 밀렛이 적밀화되는 양상과 같은 분포임을 알 수 있다.

그림 3은 계산에 사용된 공정조건을 적용한 실험을 통해 얻어진 지편의 단면으로서 구리선 요소망을



Yield stress Hardness

Fig. 5. Experimental hardness and yield stress distributions for rapidly solidified Al-Si extrudate.

압출가공 중 급속유동이 크게 발생하였음을 나타내고 있다. 선단강도가 매우 작은 윤활재의 사용과 2=60°의 완만한 다이각으로 인해 부동영역이 나타나지 않는 비교적 균질한 변형이 일어나고 있음을 확인할 수 있다. 그림 4의 매크로 부식을 통해서도 전체적인 변형양상과 급속유동을 관찰 할 수 있었다.

일반적으로 경도 값은 항복응력과 비례관계가 성립하고, 경도시험자체가 약 8%의 변형을 일으키므로¹⁴⁾ 8%변형에서의 응력값을 기준으로 본 압출재에 관한 항복응력 σ_y 와 경도값 H와의 비례상수를 구하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$\sigma_y = 3.293 H_y \quad (14)$$

항복응력의 분포는 경도분포를 측정하여 식 (14)에 적용하며, 계산을 통해 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 경도측정에의해 구한 그림 5의 항복응력분포와 그림 6을 비교하면 전체적인 분포가 동일하며, 두 경우 모두 다이부분의 마찰로 인해 표면부에서의 불균질한 분포양상을 관찰 할 수 있다. 마찰로 인해 생긴 표면부의 극단적인 전단응력은 가공경화효과를 가져오며 이로 인하여 압출재에서 중심부 보다 표면이 더 강화되는 현상을 가져온다. 국부적으로 응력분포가 계산치와 다른 부분이 존재하는 원인은 크게 계산에 의한 원인과 실험에서 발생하는 원인으로 나눌 수 있

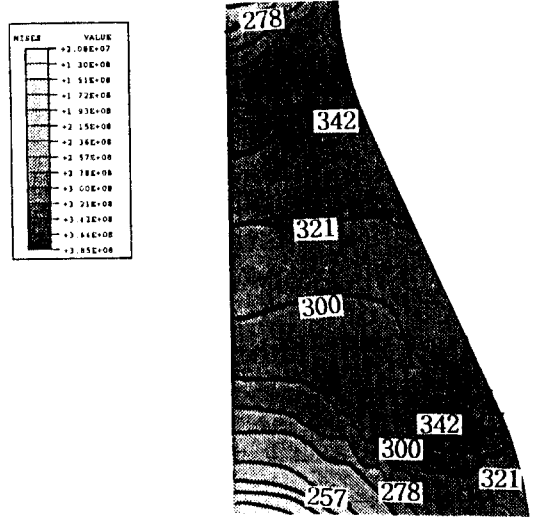


Fig. 6. Calculated effective stress distribution for rapidly solidified Al-Si extrudate.

다. 먼저 계산에 의한 원인은 계산중 다이각진 부분에서의 국부적으로 큰 격자변형에 의해 계산시 오차가 커지는 것을 방지하기 위해 실제실험조건 보다 코사인적으로 초기요소망을 구성했기 때문이고 실험상의 오차는 경도측정시 생기는 여러 제약조건, 다이와 시편간의 마찰계수측정의 어려움에서 오는 영향이 가장 주된 원인인 것으로 사료된다.

6. 결 론

급속응고된 분말압출공정을 정수압을 고려한 다공성 금속의 소성이론을 바탕으로 탄소성 유한요소법으로 계산하고, 같은 공성변수를 갖는 압출실험으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다공질의 항복현상을 보다 근사하게 예측할 수 있는 Lee-Kim식을 ABAQUS의 사용자 정의 서브루틴을 이용하여 분말압출공정을 모사할 수 있다.
- 2) 급속응고 분말 압출공정에 있어서 치밀화는 압출 초기에 이미 완성됨을 알 수 있었다.
- 3) 압출공정으로 의해 변형된 다공질시편의 항복응력분포를 미소 비커스 경도기를 이용하여 간접적으로 나타내었으며, 이렇게 구한 항복응력분포에서 다이와의 마찰과 다이각부분에의 불균질변형에의해 위치별 항복응력의 차이가 있음을 알 수 있었다.
- 4) 정확한 실험자료와 분말재의 소성항복식을 이

용하여 기공을 포함한 금속응고 분말금속의 압출공정을 이론적으로 모사할 수 있다.

참 고 문 헌

1. T. Fujita and F. Kiyota: 輕金屬, **38** (10) (1988) 653
2. H-K. Oh and J-K. Lee: J. Mech. Working. Tech., **11** (1985) 53
3. H-K. Oh and H. Son: J. Mech. Working. Tech., **13** (1986) 175
4. H-K. Oh and J-W. Park: J. Mech. Working. Tech., **15** (1987) 119
5. K. Mori, S. Shima and K. Osakada: Bull. JSME, **23** (1980) 516
6. D. N. Lee and H. S. Kim: Powder Metall., **35** (1992) 275
7. A. L. Gurson: J. Eng. Mater. Tech., **99** (1977) 2465
8. V. Tvergaard: Int. J. Fracture, **18** (1982) 237
9. S. M. Doraivelu, H. L. Geigel, J. S. Gunasekera, J. C. Malas, J. T. Morgan and J. F. Thomas: Int. J. Mech. Sci., **26** (1984) 527
10. Y. T. Im and S. Kobayashi: *Metal Forming and Impact Mechanics*, S. R. Reid (Ed.), Pergamon Press, Oxford, (1985) 103
11. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.: ABAQUS User's Manual, (1994) 6-2-23
12. J. R. Cahoon, W. H. Broughton and A. R. Kutzak: Metall. Trans., **2** (1971) 1979