

技術資料

회 전 단 조

윤 우 영* 나 경 환**

Rotary Forging

W. Y. Yon*, K. H. Ra**

1. 서론

재료를 소성변형시켜 원하는 형상으로 기계가공하는 여러 기술에 있어, 보다 적은 힘으로 보다 정밀하고 복잡한 제품을 만드는 노력이 있어왔다. 그러한 노력의 하나가 재료의 항복응력이 일정함을 이용 힘이 작용하는 시편의 면적을 적게함으로써 적은 힘으로도 소성변형시킬 수 있는 소위 부분변형기술(Incremental deformation technique)들의 개발이다. 즉, 시편의 일부에만 하중을 주어 소성변형시키고 이것을 시편의 다른 부위로 점차 이동시켜감으로써 전체적으로 균일한 소성변형이 가능케 되는 기술로 여기에는 helical rolling,¹⁾ rotary piercing²⁾, ring rolling³⁾, 회전단조 (rotary forging)⁴⁾ 등이 있다. 본 보고서는 이들중 햄머, 롤 등으로 압력이나 충격을 주어 가공하는 단조기술에 적용되는 부분변형기술인 회전단조에 대해 소개하려 한다.

회전단조는 시편에 주기적인 국부 압축을 가해 이를 연속적으로 이동 시킴으로써 시편의 모양을 변형시키는 기술로 크게 두가지 형태의 기계로 발전되어 왔다. 즉, 1910년 미국의 베들레헴 제철에서 개발된 Slick Mill⁵⁾과 1968년 폴란드에서 개발된 Rocking-die 기술로⁶⁾, 근래에 들어와 후자의 기술이 학계와 산업계에 크게 각광을 받아 구미 각국, 동구 및 일본⁷⁾ 등에서 매우 활발히 연구 응용되고 있다. 본 소개에서도 후자에 중점을 두어 설명하겠다.

2. 원리

일반적인 단조공정에서의 다이 형태와 시편에

미치는 응력을 회전단조의 경우와 비교하여 그림 1에 실었다. 그림에서 보듯이 일반적인 단조공정에서는 하중이 시편 전체에 부과되나, 회전단조 공정에서는 하중이 단지 시편의 일부에만 부과됨을 알 수 있다. 즉, 회전단조의 상부다이는 하부다이 축에 대해 약간 기울어져 있어 시편의 일부에만 단조하중을 가하게 된다. 다이가 회전함에 따라 다이와 시편이 닿는면(footprint)은 시편의 다른 부분으로 이동하게 되며 원하는 모양을 얻을 때까지 회전되고 소성변형 된다. 더우기 이경우 시편과 다이 사이의 마찰은 전통적인 공정에서의 미끄럼 마찰(sliding friction)대신 굴림마찰(rolling friction)이므로 크게 줄어들게 되고 그러므로 상부다이의 회전 시 금속시편은 매우 쉽게 방사상으로 변형됨을 알 수 있다. 또한, 이경우 최고응력, δ_{max} 도 항복 응력 δ_f 을 약간 상회하는 정도임을 알 수 있다.

회전단조 단조에서의 상하부 다이 사이의 경사각은 단조하중의 양을 결정하는 가장 중요한 함수이다. 즉, 경사각이 크면 접촉면적이 적어지고 그러므로 작은 하중으로 시편 전체를 소성변형시킬 수 있게 된다. 그러나, 이 경사각이 커질수록 구동력과 베어링계가 더욱 큰 축방향(lateral)의 부하가 걸리며 단조공정중 프레임 변형이 더욱 심해 초기의 정밀도를 유지하기가 어려워지는 까닭에 기계 설계와 기계의 보수 유지가 어려워진다. 경사각외에 다이들 간의 움직임의 형태 또한 중요한 변수이다. 크게 둘로 나눌 수 있는데, 하나는 회전다이단조(rotary-die forge)로 이때의 상하부 다이들은 각기 자신의 축을 중심으로 회전할 뿐 서로간의 세차나 요동운동은 없는 경우고, 또 하나는 요동다이단조(rocking-die forge 또는 orbital forge)로 이경우의 상부다이는 하부다이 면에 대해 여러가지 방법으로 요동하는 형태이다. 가장

* 고려대학교

** 생산기술연구원

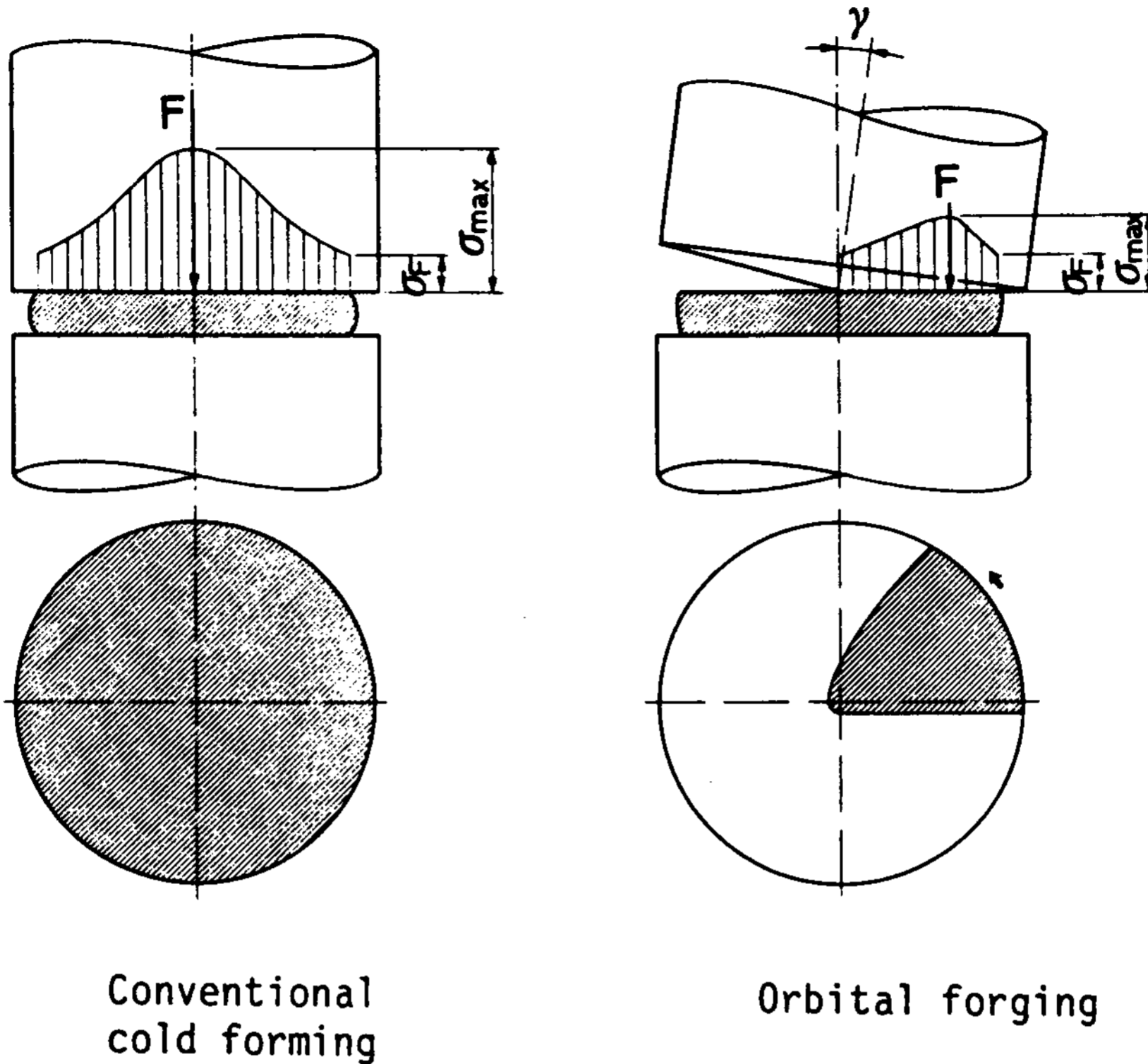


그림 1. 회전단조의 원리

보편적인 요동 형태는 하부다이 축에 대해 원형으로 궤도운동하는 것이고, 이 외에도 직선형, 나선형, 꽃 무늬형 등의 요동 형태가 있다.

3. 응용

회전단조는 보통 전통적인 낙하해머(drop-hammer) 또는 프레스단조법을 대체할 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히 모양이나 크기의 복잡함으로 전통적인 방법으로는 제작하기 어려운 부품들의 기계가공에 응용되어 (예를들면, 좌우가 비대칭(asymmetric)인 제품들의 제조도 가능), 미국에서는 1988년 현재 전통적인 낙하해머와 프레스단조로 제조되었던 부품들의 약 1/3-1/4가량이 회전단조법으로 제조되고 있다⁸⁾

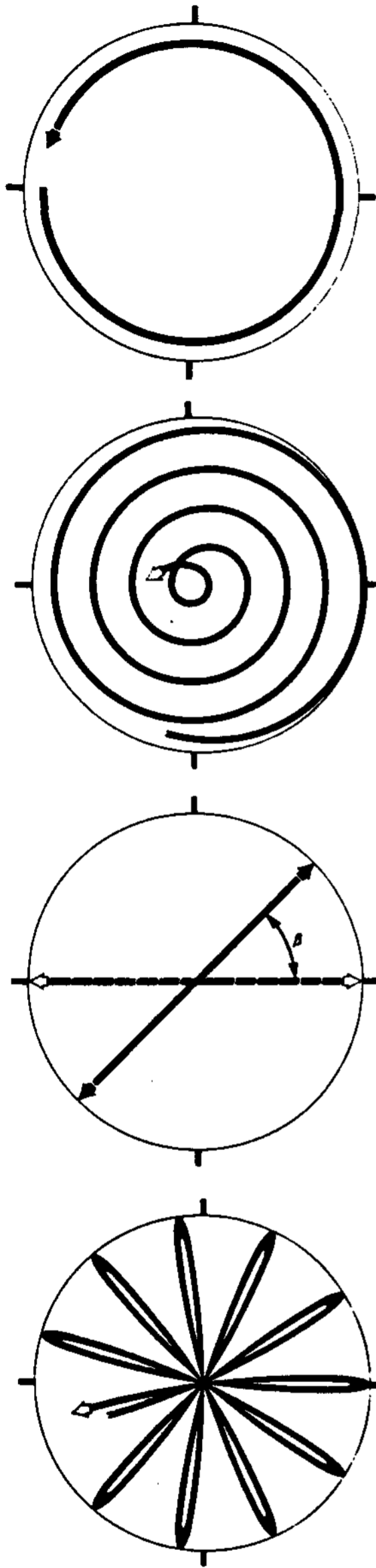
회전단조로 제조 가능한 부품으로는 기어, 플랜지, 허브(hub), 캠, 링, 구배진 롤러, 디스크 등이 있으며 이들 대부분은 원형 요동 다이 움직임으로 제작이 되고 (그림 2-a)보다 복잡한 모양의 부품들, 예를들면 비대칭 T-플랜지 등은 보통 직선형

(그림 2-c)으로 제조가 가능하다. 또한 회전단조는 전통적인 형태의 단조공정에서 보다 다이들 간의 마찰이 적어 작은 힘으로 축방향의 변형을 많이 줄 수 있으므로 (30% 이상 쉽게 변형) 직경 대 두께 비가 큰 단조 부품에 유리하다고 하겠다.

그림 3에 회전단조를 허브를 제작할 때의 각부의 명칭을 그림 4에는 허브 제작의 단계적 과정을 도식적으로 나타내었다. 그림 5에는 회전단조 공정의 시편 제조 방법을 나타내었다. 즉, 주된 4가지 형태의 가공방법이 있으며(그림 5 a-d), 또한 이들을 복합한 방법도 소개하였다. (그림 5-e).

4. 시편의 종류

회전단조용 재료는 철계, 비철계에 가리지 않고 적절한 연신율과 냉간가공 성질을 갖는 재료이면 모두 가능하다. 보통 탄소강, 합금강, 스테인레스강, 황동, 알루미늄계 합금 등이 이용된다. 일반적으로 록크웰 C경도계로 30대 중반 이하인 강들은 냉간 회전단조로 가공하고, 이보다 강한 재료들은



a. Circular motion

For concentric deformation (the angle of the orbital bell γ is adjustable from $0 - 2^\circ$).

b. Spiral motion

For radial and axial deformation; well formed centers (γ changes in cycles from $0 - 2^\circ$).

c. Straight pivoting

For forming in two directions (the angle β of direction is adjustable; γ changes in cycles from $0 - 2^\circ$).

d. Daisy pattern

Especially for forming parts with features on their faces, e.g. bevel gears, clutch parts etc. (γ changes in cycles from $0 - 2^\circ$).

그림2. 상부다이의 요동형태

단조전 열처리하거나 열간 또는 온간(warm) 단조한다 (보통강의 경우 재결정 온도 이하, $650-800^\circ\text{C}$) 온간 회전단조는 냉간 회전단조 공정에 비해 단조능이 커지나 고온으로 인한 시편의 가공경화의 감소가 예상되고, 고온으로 인한 다이 마모의 증가로 다이의 수명 단축이 있어 이를 피하려면 다이재료에 더욱 많은 고려가 있어야 한다.

5. 장점 및 단점

(장점) 회전단조의 가장 큰 장점은 시편 가공에 드는 축방향 하중의 감소로 전통적인 단조공정에 비해 약 $1/5-1/10$ 의 가공력으로 성형이 가능하다는 것이다.⁸⁾ 단조하중의 감소는 다이와 시편 사이의 마찰을 감소시켜 다이와 기계의 공정중 변형을 줄일 수 있으며 그로인해 복잡한 부품의 계속

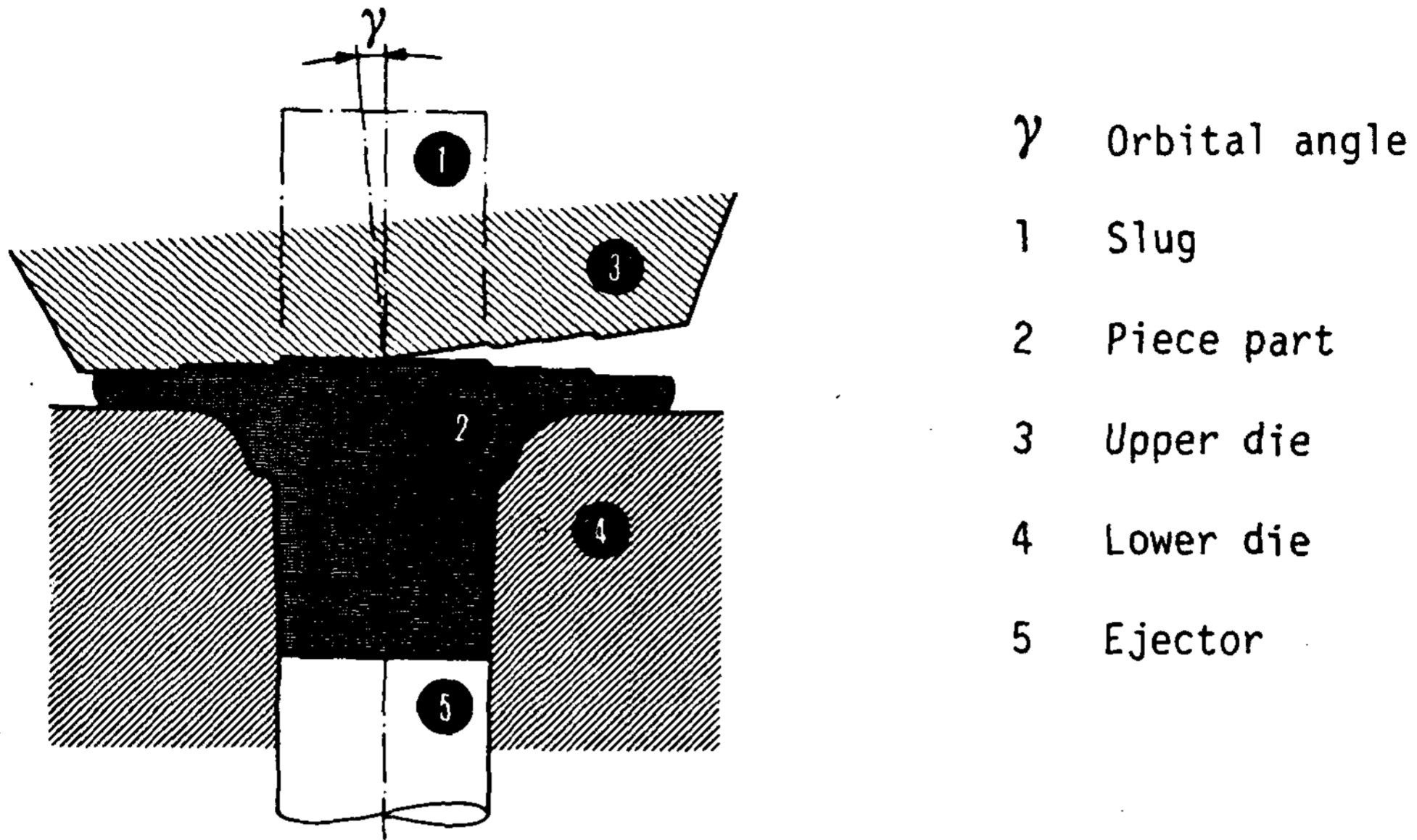


그림3. 회전단조를 이용한 허브제작

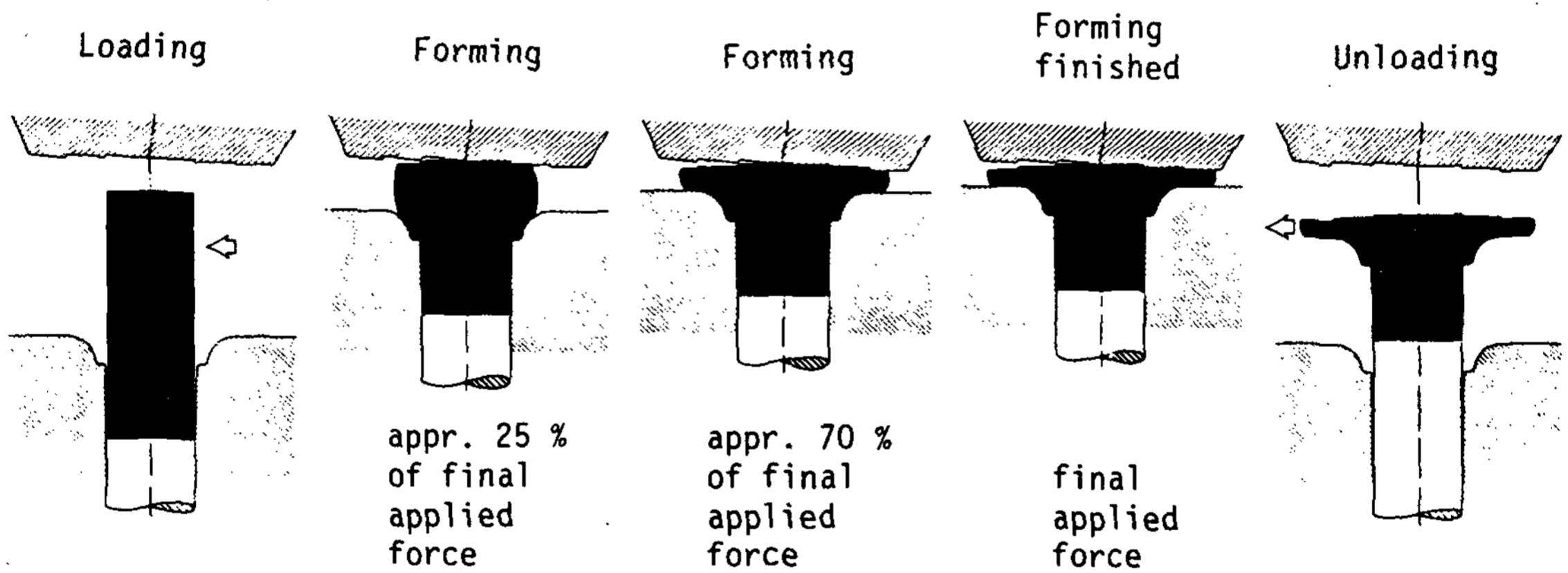


그림4. 허브제작 작업의 순서

적인 고정밀 가공이 가능하다. 더욱이, 종래의 방법으로는 여러번의 공정을 거쳐야 할 것을 단 한번의 작업으로 최종모양(netshape)의 제조가 가능하여 제조시간의 절약 나아가서는 공정 간의 이동이 필요 없어 공장자동화에도 큰 도움을 준다.

장비 가격면에 있어서도 상대적으로 적은 작업 하중으로 인하여 다이제조 경비의 절약으로 유리하며, 다이 교환과 조정 시간의 단축으로 생산성의 증가도 기대할 수 있다. 또한, 종래의 단조공정에서와 같은 단속적인 충격이 필요 없어 진동, 소음,

먼지 등의 공해와 작업장의 안전사고도 감소시킬 수 있다.

실제 단조하중의 증가로 종래의 방법으로는 열간가공하여야 할 부품도 냉간가공으로 작업할 수 있으며 그로인해 다이 마모 감소와 작업 조건의 유리 뿐만아니라, 냉간 가공경화 조직도 얻을 수 있다. 이외에도 가공한계가 좋아지고 가공면의 상태 또한 우수한 특징을 갖고 있다.

(단점) 회전단조의 주된 단점은 비교적 신기술이므로 기술적으로 많은 어려움이 있다는 것이다.

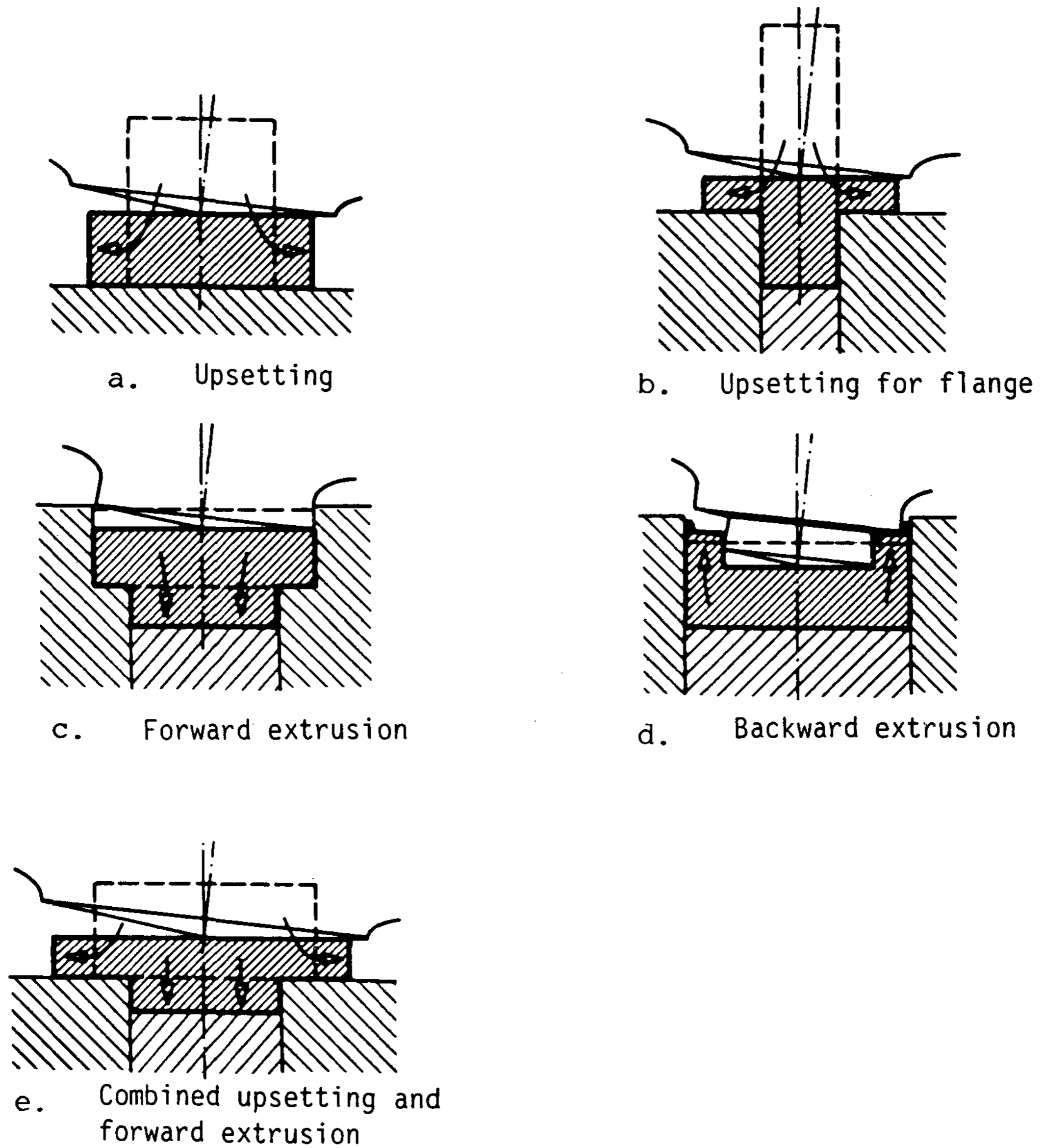


그림5. 회전단조시 가능한 작업형태

즉, 어떤 부품이 전통적인 공정보다 유리한지, 심지어는 회전단조로 제조가 가능한지 등의 기초적인 작업지침의 마련도 아직 미숙한 상태이다.⁸⁾ 그러므로 현재는 아직 많은 나라에서 시행착오 (trial-and-error)을 기본으로 작업을 하고 있다. 또 다른 큰 단점은 회전단조 기계의 설계에 있

다. 즉, 독특한 다이 움직임과 큰 축방향의 힘의 존재로 일정한 수준의 정확도를 보장하기 위한 장치의 구동계, 베어링계, 전체 프레임 등의 설계가 어려워 세계적으로 기계 개발이 계속되고 이로 인해 장비 가격이 매우 높은 편이다.

6. 기계

회전단조기는 그들의 다이들의 운동 형태에 따라 나눌 수 있다. 즉, 다이들의 운동은 회전(rotational), 요동(orbital), 병진(translational)의 세가지형태로 나눌 수 있는데, 다이들 간의 이들 운동의 조합에 따라 단조장치도 나뉘어 진다. 회전(rotational or spin)운동은 다이가 자신의 축을 중심으로 도는 것을 의미하며(그림6-a), 요동(rocking or orbital)운동은 경사진 상부다이가 자신의 축을 중심으로 돌지 않고 하부 다이의 축을 중심으로 세차(precession)운동하는 것을 말한다(그림 6-c) 여러 요동운동 모양이 가능한 데 현재 사용되는 원형 등의 일반적인 4가지 꼴(pattern)은 이미 그림 2에 나타내었다. 병진(translational)운동은 시편을 다이 사이로 소위장입(feed) 하기 위한 운동을 말한다. 그림 6에 다이의 세 운동을 조합한 여러 기계의 특징을 나타내었다.

경사진 상부 다이가 회전과 병진 운동을 하고 하부 다이는 회전 운동만 하는 장치를 보통 회전다이기(rotating-die machine)라 하며(그림6-a), 이때 동력 전달은 상 하 각기 따로 전달 되거나, 하부다이만 전달되는 방식의 두 가지가 있다. 경사진 상부다이가 항상 요동운동을 하는 요동다이기(rocking-die machine)는 상부다이가 회전과 병진을 함께 하는 형태와(그림6-b), 이들 운동은 없고 단지 요동운동만 하는 형태(그림6-c)가 있

다. 그러므로 후자에 있어서의 시편은 하부다이의 병진운동에 의해 장입된다.

어떠한 회전단조기를 선택하는 가는 주로 기계의 제작과 유지의 편리성에 의존한다. 일반적으로 많은 운동이 복합된 기계 일수록 제작과 유지가 힘들고 공정중 정확도도 떨어질 위험이 있다. 그러므로 요동다이가 보다 복잡한 제품(특히 비대칭형 등)을 제조할 수 있으나, 다이와 프레임의 움직임이 크므로 회전다이가 보다 작업중의 정확도에서 다소 떨어진다. 또한 요동다이는 기계의 유지(maintenance)도 어려워 일반적으로 대칭형 부품의 제조는 회전다이를 많이 쓴다.

7. 결론

새로운 단조 방법인 회전단조는 비록 우리에게 다소 낯 설은 기술이나 가공력, 경제성, 산업재해, 공해방지 등에서 매우 유리하고, 제품의 정밀도와 기계적성질이 우수하며, 냉간에서 열간 까지의 성형 방법 또한 매우 다양한 장점을 가지고 있다. 그러므로 기어, 캠, 링, 허브, 플랜지 등의 대칭 및 비대칭형 기계 부품을 보다 정확하고 단순한 공정으로 제작 할 수 있다. 비록, 기계 장치와 금형제작 등의 어려움이 있으나, 세계적으로도 비교적 근년에 들어와서 활발한 연구가 진행되고 있어, 우리도 기계 개발과 아울러 체계적 연구를 경주하면 보다높은 기술 습득과 이로인한 기술우위가 가능할 것이다.

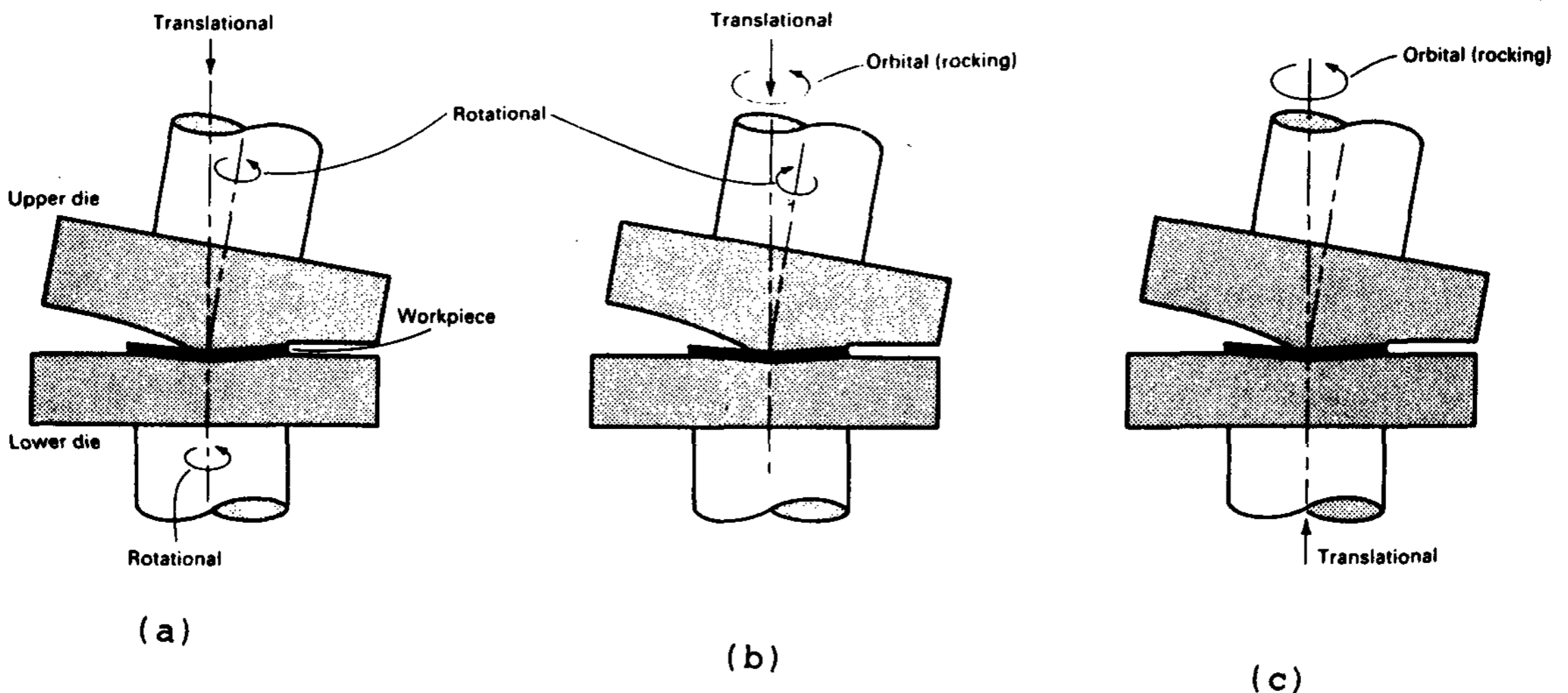


그림6. 회전단조 에서의 다이 움직임의 예

참 고 문 헌

1. H. Kudo and M. Yokai, Investigation into the helical rolling process', Proc. 8th Int Mach. Tool Des. and Res Conf. Univ of Manchester, 1967.
2. T. Z. Blazynski and I. M. Cole, An analysis of redundant deformation in rotary piercing', Proc. Inst. Mech Eng. 178(pt1. No. 33), 1963-4, 867.
3. W. Johnson and G. Needham, Int J. Mech
4. P. M Standring and E. Appleton, Chart Mech. Eng. 26(4), 1979, 44.
5. The Slick Mill', The Iron Age, vol 102, No. 9, 1918, 491.
6. Z. Marciniak, Mach. and Prod. Eng. 117, 1970, 792
7. P. M. Standring and E. Appleton, J Mech Working Tech. 3, 1980, 253.
8. A. C. P. Chou, P. C. Chou and H. C. Rogers, Metals Handbook, 9th ed. vol 14, ASM, 1988, 176.

國內外鑄物關係行事

1990

11월22일~11월23일

(社) 韓國鑄造工學會
1990년도 15回定期總會, 學術發表 및
鑄物技術講演會
90 구조종합전시회
(Korea Cast Expo90)
스위스그랜드호텔, 서울.

10월5일(금)

(社) 韓國鑄造工學會
外國人招請講演會
스위스그랜드호텔, 서울.

10월26일(금)

(社) 韓國鑄造工學會 · (社) 大韓金屬學會
제1회 응고기술심포지움
서울대학교 신소재 공동연구소, 서울.

11월7일~11월8일

FMJ International publications Limited
Castings & Forgings 90
Trentbam Gardens Show Center,
North Staffordshire, England.

9월10일~9월11일

The International Meehanite Metal Co. Ltd

54th International Meehanite Conference.
Birmingham, England

9월10일~9월14일

Deutsche Gesellschaft für Galvano-u
2th International Conference on Plasma
Surface Engineering

9월 23일~9월28일

CIATF
57th World Foundry Congress
大阪, 日本

9월25일~9월26일

American Foundrymen's Society, Inc &
American Coke & Coal Chemicals Insti-
tute
Conference ;Coke and the Cupola
Westin Hotel, Cincinnati, OH, U.S.A.

9월25일~9월27일

British National Committee for Electroheat
Plasma for Industry and the Environ-
ment
Oxford, England

10월15일~10월17일

New Smelting Reduction and Near-
net-shape Casting Technologies for Steel
Pohang, Suath Korea

(자세한 내용을 원하시면 학회로 연락바람)