

# 강소성 유한 요소법을 이용한 냉간 2단 헤딩가공에 있어서 CAD/CAPP 시스템의 구축에 대한 연구(I)

신 영 우

여수수산대학 냉동공학과

(1993년 11월 5일 접수)

## A Study on structure of CAD/CAPP system in the heading process using rigid - plastic finite element analysis

Young - Woo SHIN

Yosu National Fisheries University

(Received November 5, 1993)

The conventional cold-heading process for the production of a bolt-shaped product is composed of some process and two or three blows heading. The strength of a bolt-shaped product produced by multi-blow heading depends on the working conditions of the heading process such as preforming die angle, corner-radius of the necked portion of product, and the reduction in height during pre-forming. A rigid-plastic finite-element program (RDHPSC) has been coded and the program testified by comparison with the results of experimentation. A method of testing the optimum die-conditions in the double-blow heading process by use of RDHPSC analysis is discussed. a fundamental structures of CAD/CAPP system for two-blow heading process is discussed.

### 서 론

볼트는 가장 널리 쓰여지고 있는 기계 요소중의 하나로서, 현재의 기계의 구조물 경량화 및 안정성에 대한 요구의 증대는 볼트에 대하여 더 강하고 안전 할 것을 요구하고 있다. 대부분의 볼트 및 볼트형상의 제품의 머리부분은 헤딩 가공을 통하여 만들어지고, 이때 변형율이 커짐에 따라 좌굴 현상이 발생하기 쉬워지므로 대부분의 헤딩가공은 2단 이상의 다단 가공이 된다. 헤딩가공에 관

한 연구로서는 Billigmann 등<sup>1,2)</sup>에 의한 것이 제일 유명하고, 현재의 다단 헤딩가공에 있어서의 예비성형의 기준이 되고 있다.

헤딩 가공중 생기는 결함은 변형부중심의 미소 결함인 내부결함 및 제품 표면 균열 등의 외부결함이 있고<sup>3)</sup>, 이중 외부결함은 제품의 불량으로서 처리되나 내부결함은 볼트 결합체의 중요한 파괴의 원인이 된다. 이러한 내부결함의 발생에는 헤딩가공시의 가공조건이 중요한 요인이 되나, 실제의 헤딩제품의 가공공장에서는 가공 조건으로서

고전적인 Billigmann의 제안<sup>1,2)</sup>을 2단 헤딩시의 예비성형 형상 기준으로서 하여, 각 제조 공장에서의 경험 및 know-how를 가미하여 적절히 선택하고 있는 것이 현실이다. 그러나 최근에 있어서 요구되는 제품의 다양화는 규격품이외의 각종 머리모양의 헤딩제품의 제조를 필요하게 하고, 이 경우에는 Billigmann의 조건이 그대로 이용되어 질 수 없으므로, 새로운 제품의 제작을 위하여는 시행착오적인 실험의 반복에 의하여 가공조건이 결정 되어지고 있는 것이 현실이며, 다만 헤딩의 최적가공 조건을 결정하는 CAD/CAPP 시스템의 구축이 필요하다.

본 연구에서는 강소성 유한 요소해석을 이용한 2단 헤딩의 최적가공조건에 대한 CAD/CAPP 시스템을 구축하기 위하여

(1) 2단 헤딩가공 해석용 강소성 유한요소 프로그램(RDHPSC)를 만들고, 2단 헤딩 실험과의 비교를 통하여, 강소성 유한 요소해석이 2단 헤딩가공의 유용한 해석방법임을 밝힌다.

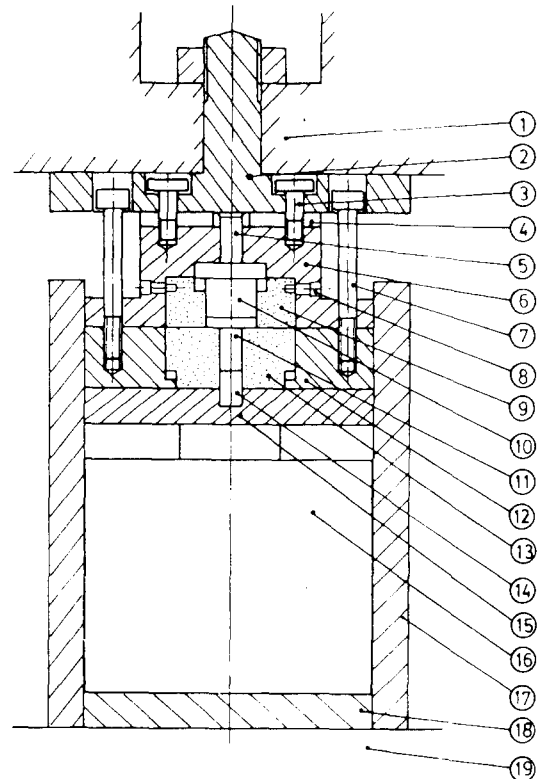
(2) 강소성 유한요소해석의 결과와 실험에 의한 가공조건의 판단기준 및 종래의 소성 가공의 연성 파괴에 있어서의 연구결과등을 비교검토하여 수치 해석에 의한 2단헤딩의 최적 가공 조건결정을 위한 CAD/CAPP 시스템의 구축을 위한 각종 인자들을 검토하였다.

## 실 험

### 2-1. 실 험

실험은 Fig. 1과 같은 실험장치를 50톤 만능인 장치시험기에 설치하여 행하였다. 냉간 2단 헤딩 가공에서의 가공조건의 영향을 실험하기 위해 Fig. 2과 같은 종류의 금형을 써서 실험하였다. 시편 및 소재의 상태를 Fig. 3에 표시하였다. Fig. 2에서의 예비성형시의 소재의 충전율은 90%로 하였다. JIS B1180과 ISO 885-1956에서 지름 10mm의 볼트의 경우 머리부의 곡률반경은 0.4mm로 정해져 있으나 실험에서는 Fig. 3(c)와 같은 종류의 하부 금형을 사용하였다. 실

험은 정적상태, 상온에서 행하여졌고 가공하중과 램의 Stroke를 로드셀(load cell)과 선형변위 측정장치를 사용하여 측정하였다.



**Fig. 1.** Scheme of experimental apparatus for double-blow cold heading: (1) press ram: (2) ram connecting plate: (3) connecting bolt: (4) knock-out plate: (5) sub knock-out pin: (6) upper container: (7) connecting bolt: (8) upper die fixing pin: (9) upper die: (10) upper knock-out pin: (11) specimen: (12) lower container: (13) lower die: (14) lower knock-out pin: (15) balancing plate: (16) load cell: (17) whole container: (18) load cell fixing plate: (19) press bed.

강소성 유한 요소법 이용한 냉간 2단 헤딩가공에 있어서 CAD/CAPP 시스템의 구축에 대한 연구(1)

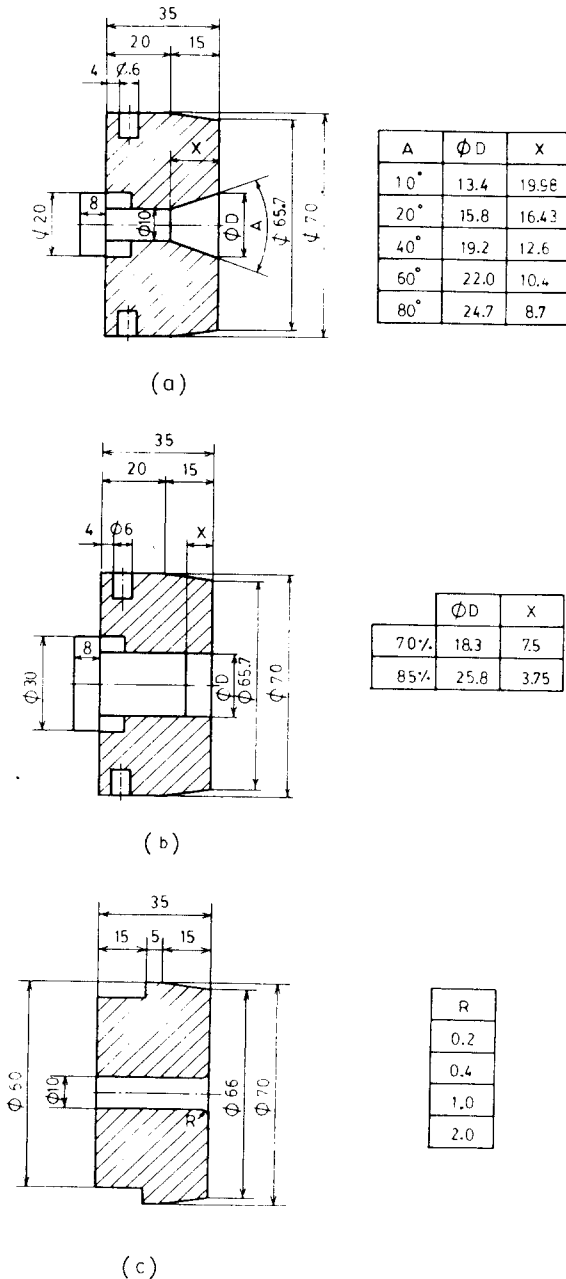


Fig. 2. Details of dies and knock-out pins: (1) pre-forming die and knock-out pin: (b) finish-forming dies and knock-out pins: (c) lower dies(dimensions in mm).

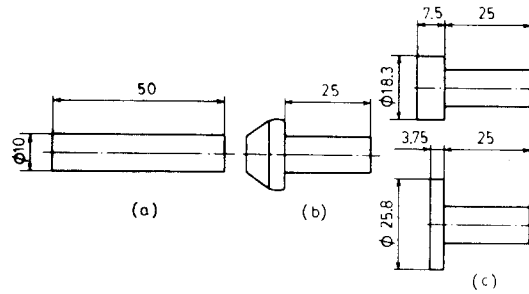


Fig. 3. Blank and products: (a) blank: (b) pre-forming product: (c) finish-formed products(upper, 70% reduction: lower, 85% reduction) (dimensions in mm).

## 2-2 실험재료

실험 재료로는 JIS A1100-BD의 상업용 알루미늄의 인발소재를 사용하여 행하였고 그 재료 실험의 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Mechanical properties of the aluminum bars used,  $\sigma=A(B+\epsilon)^n$

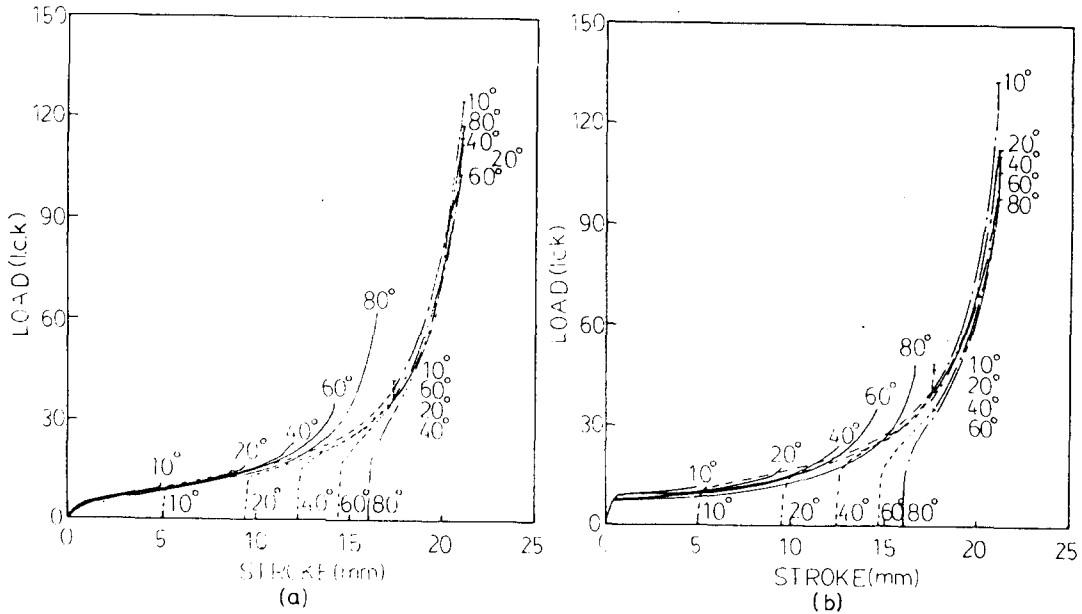
|                      | A     | B     | n     |
|----------------------|-------|-------|-------|
|                      | (MPa) |       |       |
| As-received material | 122.8 | 0     | 0.051 |
| Annealed material    | 127.8 | 0.057 | 0.299 |

## 2-3 실험내용

실험은 각 가공 조건에서의 하중-stroke 곡선을 구하고 가공후의 제품을 절반으로 잘라 Simazu HMV2000 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 경도 분포를 측정하여 변형역의 상태를 조사하였다. 측정점은 머리와 몸체 연결부위에서 0.5mm, 그 외근에서는 1mm로 하여 선형보간을 이용하여 등 경도 선도를 작성하였다.

## 실험결과 및 유한 요소법 해석과의 비교

Fig. 4에 실험에 의한 하중-stroke 곡선을 나타내었다. 실험은 시편재료를 그대로 소재로 쓴



**Fig. 4.** Load-stroke curves in double-blow heading with various pre-forming die angles (corner radius  $R=0.2\text{mm}$ ): (a) annealed material; (b) as-received material. (Full, dotted and chain-dotted lines represent pre-forming, 70% reduction and 85% reduction, respectively).

경우와, 시판재료를 풀림 처리한 경우의 두가지를 행하였고 Fig. 4(a)는 풀림처리한 소재, Fig. 4(b)는 시판소재의 하중-스트로크 곡선을 나타내고, Fig. 4는 Fig. 2의 각 가공 조건과 하중-스트로크곡선의 관계를 잘 나타내고 있다. 즉 예비성형금형의 각도가 커질수록 예비 성형시의 변형량이 많아지고, 이에따라 예비성형과 마무리 성형간의 하중-스트로크 곡선간에 불연속 양이 커지는 것을 알수 있다. Fig. 5는 시판재료에 의한 제품의 경도 분포를 나타내고 있다. Fig. 5(a), (b)는 목부분의 곡률반경  $0.2\text{mm}$ 인 경우, Fig. 5(c), (d)는 곡률반경  $2\text{mm}$ 인 경우의 경도분포를 나타내고 있고, 곡률반경이 작은 경우 예비성형 각도가 적은 쪽이 제품 머리 부분에 변형역이 잘 발달되는 것을 알 수 있고, 예비성형각도가 커짐에 따라 변형역이 점차 아래로 이동되는 것을 알 수 있다.

필자는 축대칭 다단 소성가공 해석용 프로그램을 제작하여, 그 해석 결과를 실험과 비교하였다.

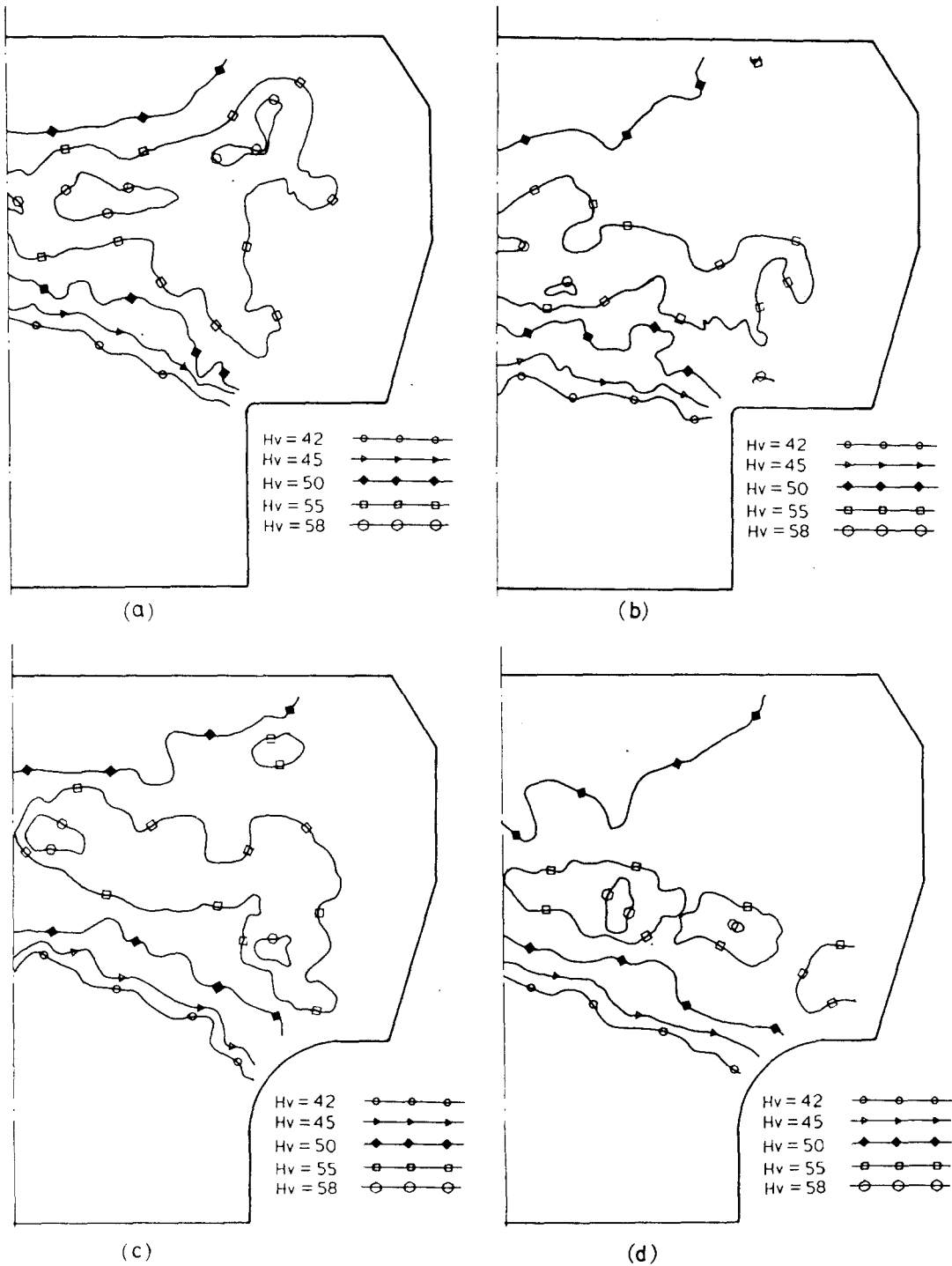
Fig. 6은  $t=mk$ 로 정의되는 마찰계수  $m$ 을 변

화시키면서 행한 RDHPSC에 의한 유한요소법 해석 결과를 검은 원으로 표시한 실험결과와 비교한 것이다. Fig. 2의 각 가공조건에 대한 해석을 행하였다. RDHPSC에 의한 2단 헤딩 공정해석의 신빙성을 확인하기 위하여 Fig. 7에서는 하중-스트로크 곡선을 실험 결과와 비교하고, Fig. 8에서의 상당 strain 분포는 변형역이 예비성형금형의 각도가 커짐에 따라 밑으로 이동하고 있는 것을 보여 주어, 실험에서 나타난 변형역이동의 경향과 일치하고 있어, RDHPSC에 의한 2단 헤딩 가공의 수치 해석결과가 신뢰성이 있음을 보여 주고 있다.

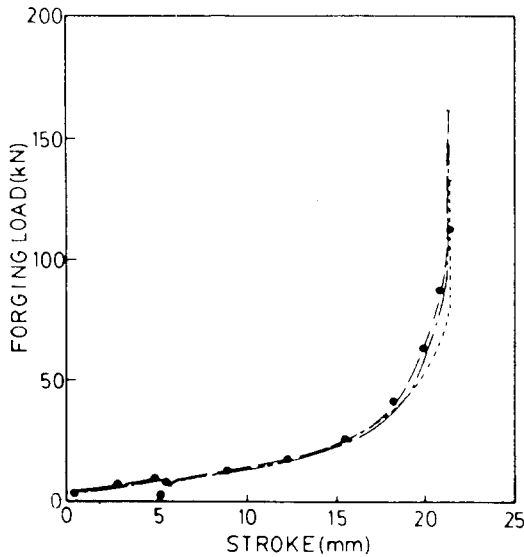
## 수치해석

### 4-1. 수치해석모델

수치해석에 있어서는 가공조건과 재료를 실제 상황에 맞도록 하기 위하여 가공조건을 Billigmann의 가공조건<sup>2)</sup>을 변형하여 사용하고, 가공재



**Fig. 5.** Hardness distribution in heading of as-received material at 70% reduction in height: (a)  $A=10^\circ$ ,  $R=0.2mm$ ; (b)  $A=60^\circ$ ,  $R=0.2mm$ ; (c)  $A=10^\circ$ ,  $R=2.0mm$ ; (d)  $A=60^\circ$ ,  $R=2.0mm$  ( $A$ : pre-forming die angle,  $R$ : corner radius of the necked portion of the products).



**Fig. 6.** Calculated load-stroke curves in double-blow bolt heading for various friction factors, for  $A=10^\circ$  and  $R=2.0mm$ . (Small-, chain- and large-dotted lines represent  $m$ -values of 0.2, 0.5 and 0.7, respectively, whilst experimental results are shown as full points).

료의 재료특성으로서는 냉간해딩용 인발재(JIS SWRCH15A)의 재료특성<sup>4)</sup>을 사용하였다.

Fig. 9는 수치해석에 사용된 예비성형시의 가공조건을 나타내고 있고 Billigmann의 가공조건에서 비 변형부의 길이를 가감하였다.  $L/d=2.5$ 의 경우의 실제 공장에서 쓰이는 예비성형금형의 각도는  $10^\circ, 15^\circ$  이나 Billigmann은  $20^\circ, 15^\circ$ 의 예비성형 금형각도도 주창하고 있어  $20^\circ$  및  $25^\circ$ 의 경우의 수치해석도 행하였다. 냉간해딩용 인발재의 재료특성식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 153.9 + 697.1 \varepsilon^{-0.226} \text{ (Mpa)} \quad (1)$$

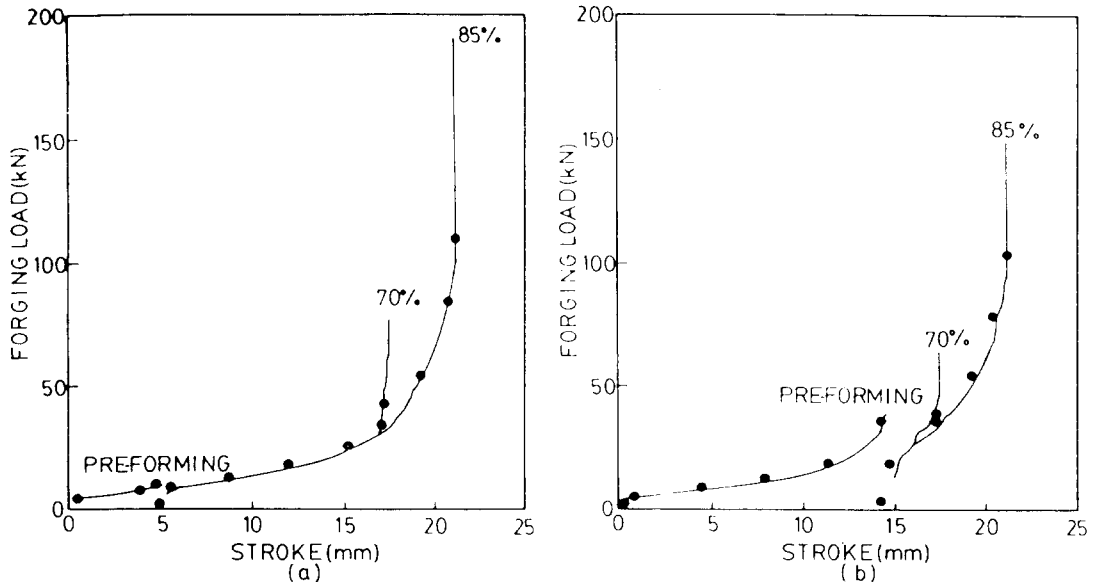
(여기에서  $\sigma$  : 상당응력,  $\varepsilon$  : 상당변형율)

마찰응력  $\tau$ 는  $\tau = mk$  ( $0 \leq m \leq 1$ )로써 정의 되며  $k$ 는 공구와 소재간의 전단 응력이고, 해석에서  $m=0.5$ 로 하여 해석하였다.

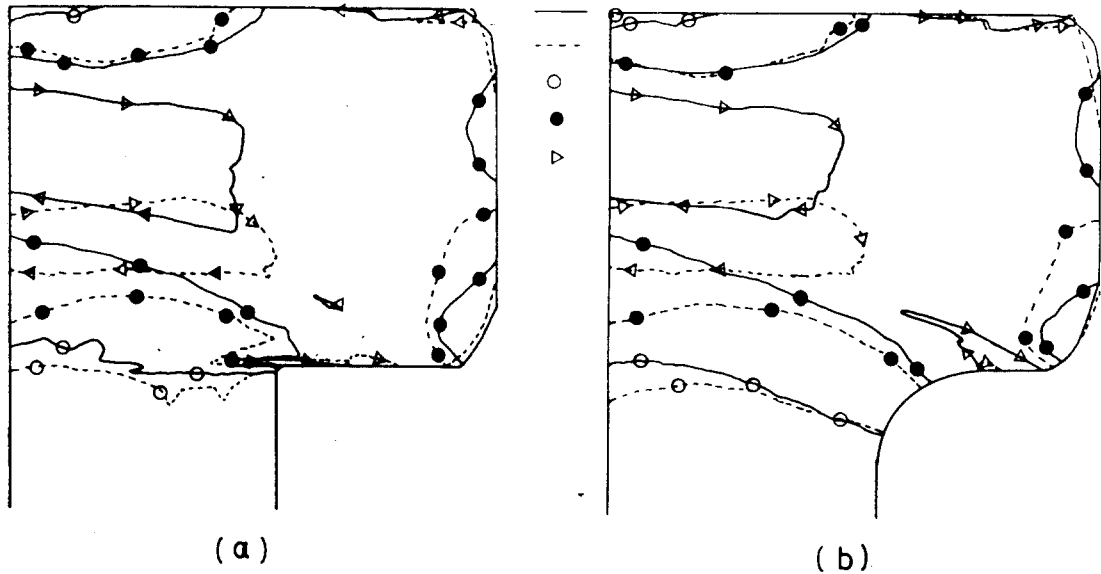
#### 4-2 수치해석의 결과와 고찰

##### 4-2-1 하중-스트로크 곡선

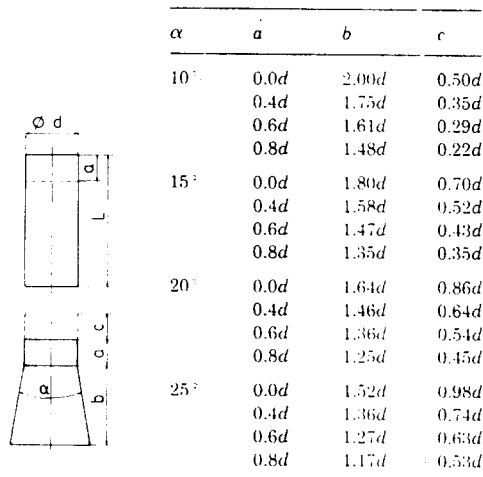
Fig. 10은  $\alpha=15^\circ, a=0.6d$ 인 경우의 대표적 하



**Fig. 7.** Comparison of calculated load-stroke curves in double-blow heading with experimental results, for  $R=0.2mm$ : (a)  $A=10^\circ$ ; (b)  $A=60^\circ$ . (Full lines represent simulation for  $m=0.7$ , whilst experimental results are shown as full points).

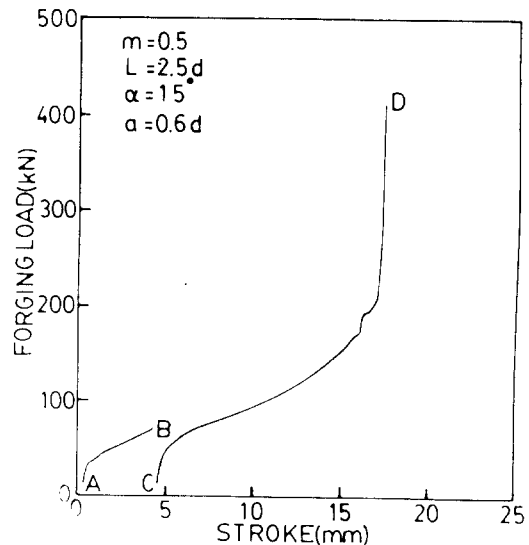


**Fig. 8.** Effective strain distribution in heading at 70% reduction in height for two pre-forming die angle: (a)  $R=0.2mm$ ; (b)  $R=2.0mm$ . (Full lines and dotted lines are for  $A=10^\circ$  and  $60^\circ$ , respectively, whilst hollow circles, full circles and triangles represent values of effective strain of 0, 2, 1.0 and 1.5, respectively).



**Fig. 9.** Die conditions in pre-forming ( $L=2.5d$ ).

중-스트로크 곡선은 나타내고 있다. Fig. 10에서 A-B 구간은 예비성형시의 C-D 구간은 마무리 성형시의 하중-스트로크 곡선이며 예비성형과 마무리 성형시의 하중-스트로크 곡선에서 약간의



**Fig. 10.** Load-stroke relationship.

불연속량의 존재하는 것이 보이며, 이 불연속량은 예비성형금형 각도  $a$ 가 커질수록, 비변형부의 길이  $a$ 가 커질수록 증가하는 것이 관찰되었다.

4-2-2 금속흐름의 관찰

금속흐름의 형상은 수치해석에 있어서의 격자 변형을 통하여 관찰되어 질수 있을 것이다. Fig. 11은 압하율 70%인 제품의 격자변형의 예를 나타내고 있다. 마무리 성형이 끝나면 대부분의 표면절점들은 상부 및 하부금형에 접하게 된다. 실제의 공장에 있어서는 완제품을 길이 방향으로 반으로 잘라 관찰하여 금속 흐름의 불규칙한 개소가 발견될때의 가공조건이 부적절한 것이라고 판단하고 있다.

유한 요소해석에 있어서는, 종방향의 격자선을 관찰함으로써 이러한 실험적인 관찰을 대신할 수 있을 것이다. Fig. 11(a)의  $\alpha=15^\circ$ ,  $a=0.6d$ 의

격자 변형상태가 정상적인 상태라고 판단할 수 있고, 예비성형 금형각도가 커지거나, 예비성형시의 비변형부길이  $a$ 가 길어지면 격자변형에 있어 불규칙적인 흐름이 나타나는 것이 Fig. 11(b), (c)에서 나타나고 있다.

이러한 결과에서 보아, 2단 헤딩제품의 금속흐름을 수치해석의 격자변형으로 관찰되어질수 있음을 알 수 있다.

4-2-3 표면결함

岡本등<sup>3)</sup>은 냉간단조중의 결함발생에 대하여 종합적으로 정리하고, 냉간 헤딩가공에 있어서는 표면 및 내부결함이 있음을 지적하였다.

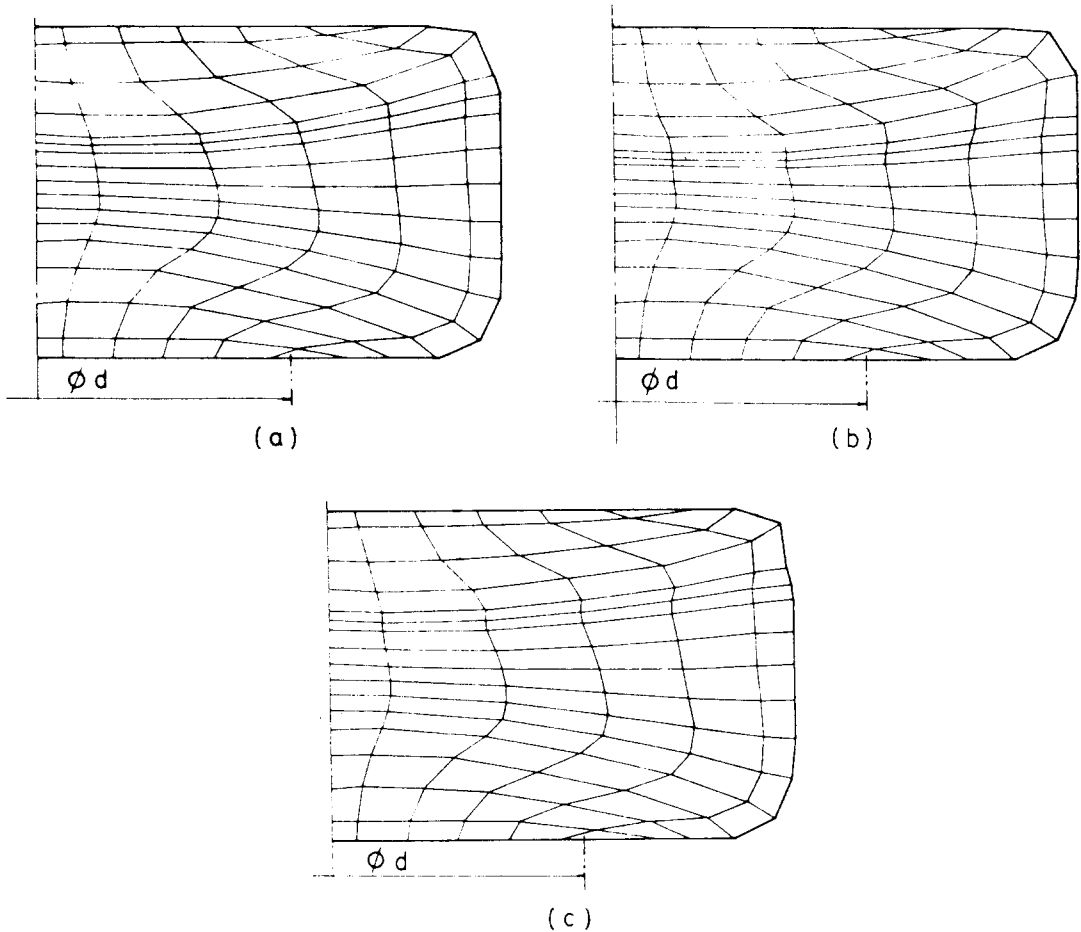


Fig. 11. Distorted grid patterns in heading at 70% reduction in height: (a)  $L=2.5d$ ,  $\alpha=15^\circ$ ,  $a=0.6d$ ; (b)  $L=2.5d$ ,  $\alpha=15^\circ$ ,  $a=0.8d$ ; (c)  $L=2.5d$ ,  $\alpha=25^\circ$ ,  $a=0.6d$ .



工藤등<sup>5)</sup>은 엷셀팅 가공 중의 실험에 있어서 자유표면의 원주방향응력과 자유표면의 결합발생이 밀접한 관계에 있음은 지적하였다. 그러므로 2단 헤딩가공에 있어서도 표면결합이 표면의 원주방향 응력과 관계가 있다고 가정할 수 있다.

Fig. 2에서 보여지는 바와같이 2단 헤딩의 마무리 성형은 밀폐단조이므로 최종적으로는 거의 자유표면을 가지지 못하게되나, 마무리 성형중 소재가 금형의 벽면에 접촉하기 직전의 상태에서의 원주방향응력  $\sigma_\theta$ 를 관찰하여 표면결합의 가능성을 생각할 수 있을 것이다. Fig. 12는 원주방향응력

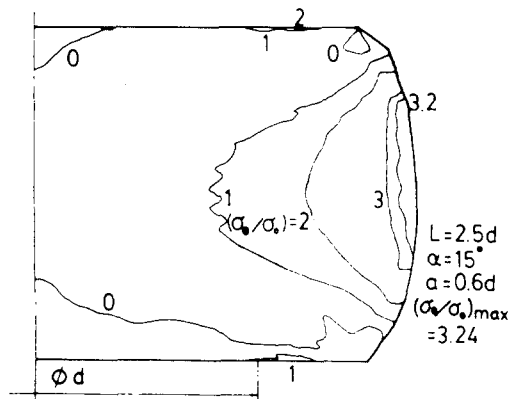


Fig. 12. Distribution of normalized hoop stress  $\sigma_\theta/\sigma_0$  at 65% reduction in height.

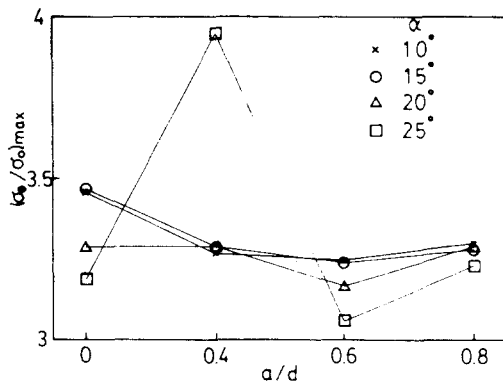


Fig. 13. Maximum hoop stress on the free surface at 65% reduction in height for various die conditions: L=2.5d.

$\sigma_\theta$ 를 최대가 됨을 보여주고 있다. Fig. 13은 Fig. 9에서 나타낸 가공조건의 수치 해석 결과에서 각 가공조건과 무차원 원주 방향응력  $\sigma_\theta/\sigma_0$ 의 값의 관계를 나타낸것으로 예비성형부 길이가  $a=0.6d$ 일 때  $\sigma_\theta/\sigma_0$ 가 최소임을 보여주고 있고, 이것은 Billigmann의 기준<sup>2)</sup>이 주장하는 가공조건이 근거가 있음을 보여주고 있다.

한편 Oyane등<sup>6)</sup>은 소성가공에서의 연성과파괴에 대한 판정기준을 다음과 같이 제창하고 있다.

$$C = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left( \frac{1 + \frac{\sigma_m}{\sigma}}{A} \right) d\bar{\epsilon} \quad (2)$$

여기에서 A, C는 재료정수,  $\sigma$ 는 상당응력  $\sigma_m$ 은 정수압 응력이고,  $\bar{\epsilon}_f$ 는 연성과파괴가 생기기점에서의 상당 변형율이다.

만약, A가 가공중 변치 않는 재료정수라면 식 (2)는 다음과 같이 쓰여 질수 있다.

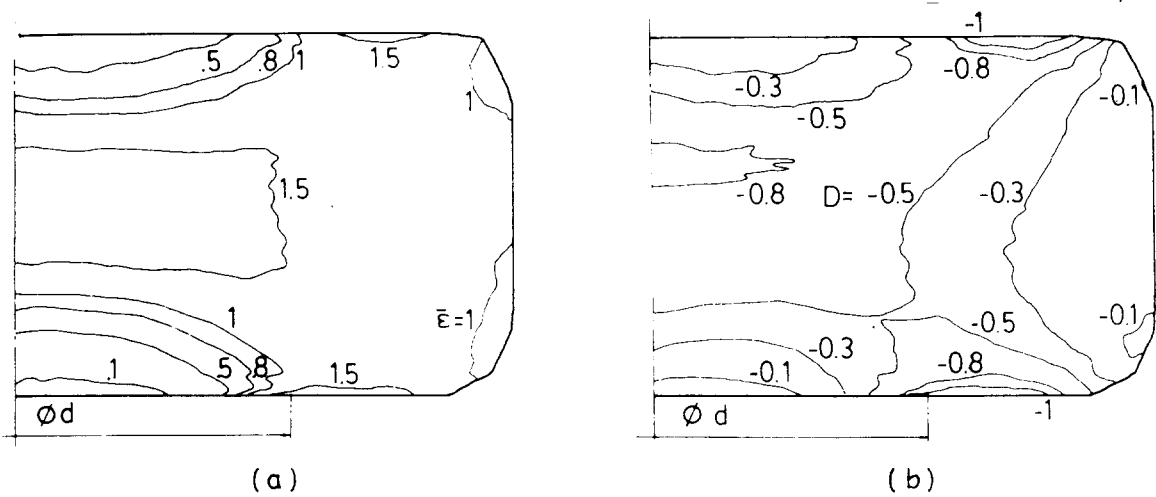
$$\begin{aligned} C &= \int_0^{\bar{\epsilon}_f} d\bar{\epsilon} + \frac{1}{A} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\sigma} d\bar{\epsilon} \\ &= \bar{\epsilon}_f + \frac{1}{A} \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_m}{\sigma} d\bar{\epsilon} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서  $\bar{\epsilon}_f$ 를 가공이 끝날 시점에서의 상당 strain로 두면 다음식으로 정의 되는 계수 D가 strain 이력에 근거한 연성 파괴의 가능성을 논하는데 있어서 중요한 요소가 될것이다.

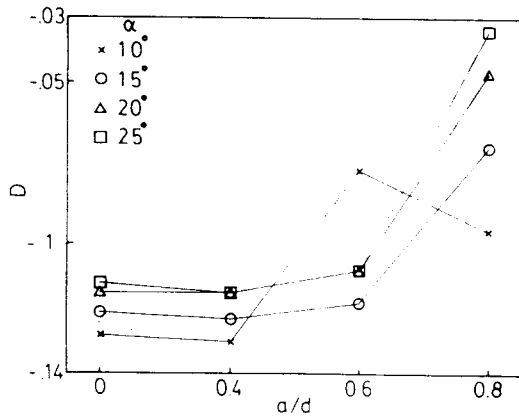
$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}} \left( \frac{\sigma_m}{\sigma} \right) d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

여기에서  $\bar{\epsilon}$ : 상당 변형율,  $\sigma_m$ : 정수 압응력,  $\sigma$ : 상당응력)

Fig. 14(a), (b)는 각각 마무리 성형후의 상당 변형율  $\bar{\epsilon}$ 와 식 (4)로 표시되는 계수 D의 분포를 표시하고 있다. 상당 변형율  $\bar{\epsilon}$ 의 제품 외측의 분포는 모든가공조건에서 Fig. 14(a)와 비슷한 형태를 보이고 있다. 계수 D의 변형역 상당 변형율  $\bar{\epsilon}$ 가 0.1이상의 부분에서의 값은 가공물의 표면쪽에서 Fig. 14(b)와 같이 최대치는 보이고 있고 이 같은 경향은 Fig. 9의 모든 가공 조건에서 동일하



**Fig. 14.** (a) Distribution of effective strain  $\epsilon$  at 70% reduction in height ( $L=2.5d$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $a=0.6d$ ): (b) distribution of parameter  $D$  defined by eqn. (4) at 70% reduction in height ( $L=2.5d$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $a=0.6d$ ).



**Fig. 15.** Maximum value of parameter  $D$  defined by eqn. (4) on the outer surface at 70% reduction in height for various die conditions:  $L=2.5d$ .

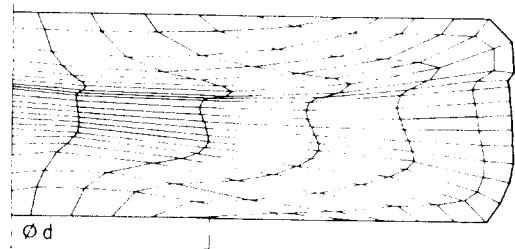
였다. 이러한 결과에서 생각할때 제품표면에서의 계수  $D$ 의 값이 2단계당중의 제품의 표면과피와 밀접한 관계가 있다고 추측 할수 있다.

Fig. 15는 계수 $D$ 의 표면 최대치와 가공조건의 관계를 나타내고 있고,  $D$ 의 값을 예비성 형금형 각도  $\alpha$ 와 예비 성형시의 비변형부길이  $a$ 가 증가함에 따라 증가함을 알수있다.

#### 4-2-4 내부결함

岡本등<sup>3)</sup>은 냉간 heading중의 내부결함에 대하여, 머리부 중심 부근에서의 수평 미소 결함과 목부분에서의 전단에 의한 미소결함을 보고하고 있다.

heading가공된 머리부 중심에서의 수평미소 결함은 큰 압하율의 heading에서 상부, 하부의 비 변형역의 사이에서 발생되며, 이러한 수평미소결함의 가능성은 수치해석에 의한 격자변형을 관찰함으로써 알수있다. Fig. 9의 가공조건과 압하율 70%에서는, 압하율이 적어 이러한 격자형상은 관찰할 수 없었지만, 압하율이 크거나 변형량이 큰 경우에는 heading 머리부의 중심부근에 격심한 변형이 생기는 것을 Fig. 16에서 알수 있다.



**Fig. 16.** Distorted grid pattern in heading at 85% reduction in height ( $L=3.9d$ ,  $\alpha=25^\circ$ ,  $a=1.4d$ ).

#### 4-2-5 공구와 소재간의 접촉압력

공구와 소재간의 접촉압력은 금형의 수명에 큰 관계를 가진 인자이다. Fig. 9의 가공조건에 대한 수치해석의 결과는 마무리 가공중의 상부 금형표면의 접촉 압력분포는 거의 일정하였다. Fig. 17는 마무리 가공이 끝나는 시점에서의 무차원접촉압력의 평균치와 가공조건의 관계를 나타내고 있고, 접촉압력은 예비 성형시의 비변형부 길이  $a$ 에 의존함을 보여주고 있다. 여기에서 공구수명을 최대로 할수있는 비변형부 길이  $a$ 가 존재함을 알수 있다.

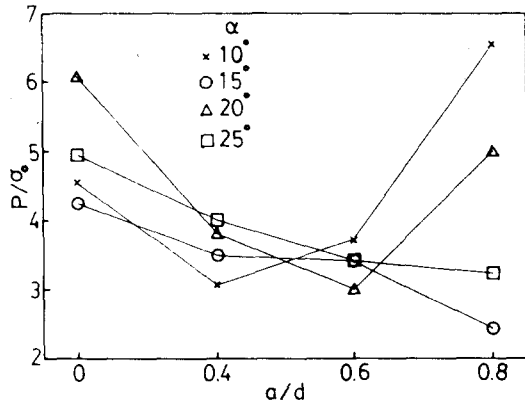


Fig. 17. Average contact pressure on the finish forming die at 70% reduction in height for various die conditions:  $L=2.5d$ .

### 결 론

- 1) 강소성 유한 요소법 프로그램 RDHPSC는 2단헤딩 가공에 있어서의 신뢰 할 수 있는 해석수단이다.
- 2) RDHPSC에 의한 2단헤딩의 해석은 2단헤

딩가공에서의 최적 가공 조건의 결정에 유용한 정보를 제공할수 있다.

- 3) 2단헤딩 가공중의 금속흐름을 수치해석에서의 격자 변형에 의해 관찰될수 있다.
- 4) 2단헤딩 가공중의 표면 결함의 발생가능성은 수치해석 결과에서 원수방향응력과 계수 D를 관찰함으로써 탐색되어질 수 있다.
- 5) 2단헤딩가공중에 있어서의 내부결함 발생가능성은 수치해석의 격차 변형을 통하여 알수 있다.
- 6) 마무리 가공금형 수명에 대한 최적가공조건은 수치해석에서의 접촉압력을 조사하여 얻을수 있다.

### 참고문헌

- 1) J. Billigmann(1952) : 日本語版 Stauchen und Presser Handbuch, 118. 日刊工業新聞社.
- 2) J. Billigmann & H.D. Feldmann(1973) : Stauchen and Presser Carl Hanserverlag, 156.
- 3) 岡本豊彦, 福田降, 萩田兵治(1972) : 冷間鍛造における材料破壊, 塑性と加工, 13-135(25)
- 4) 戸澤康壽, 加藤降, 品川一成(1985) : 構成式  $\sigma = (A + B\epsilon^n)\epsilon^m \exp(C/T)$  を考慮した冷間据えこみ加工の 温度解析, 昭60 春, 塑加構論, 417.
- 5) 工藤英明, 青井一喜(1967) : S45Cの据えこみ割れ實驗, 塑性と加工, 17, 8-72.
- 6) M. Oyane & T. Sato & K. Okimoto & S. Shima(1980) : Criteria for ductile fracture and their applications, J. Mech. Working Tech., 4, 65.