

# 유한요소법에 의한 정사각컵 디프드로잉 성형에 미치는 성형인자에 관한 연구

이명섭\* · 황종관\* · 강대민\*\*\*

\*성지공업고등학교 교사, \*\*부경대학교 대학원, \*\*\*정회원, 부경대학교 기계공학부 교수

## A Study on the Formability Factors of Sheet Metal in Deep Drawing of Square Cup by FEM

MYEONG-SUP RHEE\*, JONG-KWAN HWANG\*\* AND DAE-MIN KANG\*\*\*

**KEY WORDS:** Finite element method 유한요소법, Formability 성형성, Punch loads 성형하중, Thickness strain 두께변형률, Formability factors 성형 인자, Radius of die and punch 펀치와 다이 모서리반경, Friction coefficient 마찰계수

**ABSTRACT:** Numerical simulation of sheet metal forming for panels as well as other components has wide acceptance in the automotive industry. Therefore this paper was focused in the drawability factors (which are friction coefficient, radius of die and punch) on the square cup deep drawing by the explicit finite elements code PAM-STAMP™. The computed results are compared with the experimental results to show the validity of the analysis. In order to compare the simulation results with the experiment results and predict the effect of drawability factors, the relationships between punch load and punch stroke, and the relationships between thickness strain and distance are used. According to this study, the results of simulation by using PAM-STAMP™ will give engineers good information to access the drawability of square cup deep drawing.

### 1. 서 론

판재가공의 대표적인 공정인 디프드로잉가공은 공정이 단순하고 대량생산이 가능하여 자동차, 항공기, 가전산업 등에 널리 사용되고 있다. 이에 따라 그 성형성에 대한 관심도가 높아지고 있으나 금속의 다른 성형공정에 비해 판재가 평평한 모양으로부터 제품의 최종 형상에 이르는 동안 소성변형을 겪게 되며, 그 변형의 역학적인 문제는 성형성 및 이방성과 관련되어 매우 복잡하므로 공정 중 발생하는 여러 현상들을 해석하고자 하는 노력이 계속되어 왔다.

박판성형해석에서 일반적으로 사용되는 항복이론은 Hill이 발표한 평면 이방성 항복이론과 수직 이방성 항복이론인데 Hill(Hill, 1950)과 Chiang 등 (Chiang and Kobayashi, 1966)이 Tresca의 항복조건을 사용하여 그 역학적인 관계를 해석하였다. 이러한 디프드로잉가공 중 정사각컵 디프드로잉은 비축회전대칭 디프드로잉 과정의 하나라 할 수 있는데, 불균일한 플랜지 형상과 플랜지 주름을 초래하는 직변부와 모서리에서의 재료 유동의 비가 다르다는 것으로 인해 이를 해석하는 것은 상당히 복잡한 작업이라 할 수 있다. 이에 대해 Hsu 등(Hsu and Lee, 1977)은 Swift 시험을 토대로 비원형단면 디프드로잉과정

의 성형성을 일반화하였고, Hasek 등(Hasek and Lange, 1979)은 미끄럼선장법을 이용하여 플랜지 형상 및 귀발생 현상 등에 대해 설명하였다.

최근 3차원 박판금속의 성형해석이 실현가능하게 된 것은 무엇보다도 박판금속 성형공정해석을 효과적으로 수행할 수 있는 유한요소법의 개발에 따른 것이다. 이러한 유한요소법을 이용한 박판의 성형공정해석은 성형 중 박판의 변형된 모양, 성형부하, 변형률, 응력분포 및 성형조건을 수정하고 경우에 따라서는 재료의 등급을 조정하여 짧은 시간에 최적의 금형을 개발할 수 있는 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. Kobayashi 등(Kobayashi et al., 1978)은 수직 이방성을 고려한 축대칭 판재 해석을 수행하였고, Shim 등(Shim and Yang, 1994)은 기하학적 비선형을 고려한 유한요소해석을 수행하였으나 이들 연구는 박막요소를 사용하여 해석되어지므로 두께방향의 변형을 고려하지 못하였다.

본 연구에서는 정사각컵 디프드로잉에 있어서 펀치, 다이, 블랭크호울더 및 블랭크를 I-DEAS로 모델링해서 PAM-STAMP™로 해석하여 구한 결과를 실험결과치와 서로 비교 분석하고, 또 펀치 및 다이의 모서리반경과 마찰계수를 각각 변화시켰을 때의 해석을 부가하여 정사각컵 디프드로잉 시의 성형성과 성형에 미치는 성형인자의 영향을 해석하고자 한다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 모델링

해석을 위한 모델링 작업은 4개의 요소(다이, 펀치, 블랭크호울더, 블랭크)가 모두 면대칭이므로 1/4 모델링을 하였다. Fig. 1은 다이, 펀치, 블랭크호울더 및 블랭크의 FE 모델 등을 나타내고, Fig. 2는 초기 접촉상태를 나타낸 것이다.

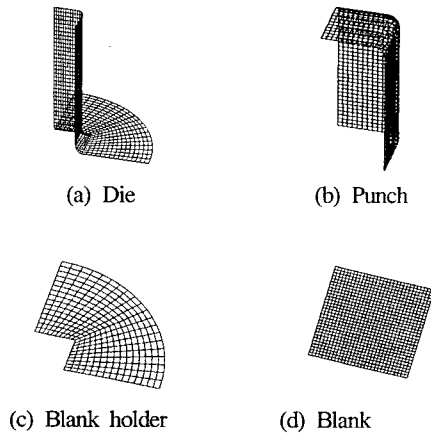


Fig. 1 FE models used for analysis

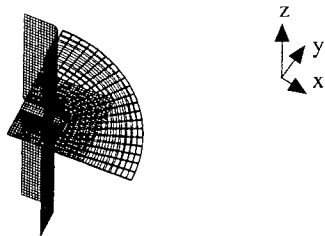


Fig. 2 FE model before deformation for FEM

그리고 해석에 사용된 펀치, 블랭크, 블랭크호울더 및 다이의 절점수와 요소수는 Table 1과 같고 재료의 물성치는 실험재료인 냉연강판 CQ, DQ, DDQ의 물성치와 동일하고 그 중 탄성계수(E), 강도계수(K), 가공경화지수(n) 및 이방성계수(R)는 Table 2에 나타난 것과 같이 인장시험의 결과에서 구하였다.

모델에 사용된 재료형식은 블랭크를 이방성 탄-소성체로 선택하고, 펀치, 다이, 블랭크호울더 부분은 null material로 선택하였다. 또, 재료의 소성거동은 식(1)과 같이 Krupkowsky모델을 사용하였다.

$$\sigma = K (\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_0$ 는 재료의 초기 변형률이다.

Table 1 Detailed characteristics used for models

	punch	blank	holder	die
number of nodes	604	961	651	861
number of elements	560	900	600	800
length of x-axis	35	75	125	125
length of y-axis	35	75	125	125
length of z-axis	-101.2	0	-6	100
thickness	10	1.2	10	10
element type	shell	shell	shell	shell

Table 2 Mechanical properties used for models

element	blank			punch, die, blank, holder
	CQ	DQ	DDQ	
material type	elastic/plastic anisotropy			null
density(GPa)	7.87e-06	7.87e-06	7.87e-06	7.87e-06
Young's mod.(GPa)	218	218	218	218
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3	0.3
strength coeff.(GPa)	0.5439	0.5557	0.5419	-
strain offset	0.0118	0.0063	0.0105	-
hardening exp.	0.2400	0.2580	0.2660	-
Lankford coeff.	1.1149	2.0239	1.6885	-
thickness(mm)	1.2	1.2	1.2	10

### 2.2 경계조건 및 시간조정조건

유한요소해석에서의 해석 결과는 실제 실험과 동일한 성형 조건을 부가하였다. 블랭크는 1/4 모델로, 변위 경계조건은 Table 3과 같이 구속조건을 부과하였고, 펀치, 다이 및 블랭크호울더에 대해서는 Table 4와 같이 부여하였다.

또한 해석에 사용된 시간조정조건은 Table 5와 같은데 펀치의 진행속도는 7mm/sec로 하였다.

Table 3 Displacement boundary condition

	x-trans.	y-trans.	z-trans.	x-rot.	y-t	z-rot.
center	fixed	fixed	free	fixed	fixed	fixed
x-axis	fixed	free	free	free	fixed	fixed
y-axis	free	fixed	free	fixed	free	fixed

Table 4 Rigid body boundary conditions used in the FE(die, blank holder, punch)

	x-trans.	y-trans.	z-trans.	x-rot.	y-rot.	z-rot.
die	fixed	fixed	fixed	fixed	fixed	fixed
holder	fixed	fixed	free	fixed	fixed	fixed
punch	fixed	fixed	free	fixed	fixed	fixed

Table 5 Time control conditions

	conditions
termination time	3.32942
number of state for time history	200
number of state for plot history	10
scale factor for time step	0.9
sub-cycling	no
time step	large, bend

### 3. 실험

#### 3.1 인장시험

인장시험에 의한 재료의 기계적 성질은 Table 6에 나타내었다. 이방성계수(R)는 시편의 15% 신장 위치에서 시편의 폭방향 변형률과 길이방향 변형률을 측정하여 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_l} = \frac{\epsilon_w}{-(\epsilon_l + \epsilon_w)}$$

$$= \frac{\ln(w_0/w)}{\ln(l/l_0) - \ln(w_0/w)} \quad (2)$$

여기서  $l_0$ ,  $w_0$ 는 변형 전 시편의 길이와 폭이다. 가공경화지수(n)와 강도(K)는 인장시험 결과를 토대로 진응력-진변형률곡선의 근사식인

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (3)$$

에서 유도되는 대수그래프 상의 기울기로부터 구하였다. Fig. 3은 각 재료들에 대한 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다.

Table 6 Mechanical properties of test materials

material	Y.S (kgf/mm <sup>2</sup> )	T.S (kgf/mm <sup>2</sup> )	E (%)	K (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_0$	n	R
CQ	26.48	36.50	34.3	55.5	0.0118	0.2400	1.1149
DQ	20.80	32.84	41.5	56.7	0.0063	0.2580	2.0239
DDQ	19.21	30.16	44.3	55.3	0.0105	0.2660	1.6885

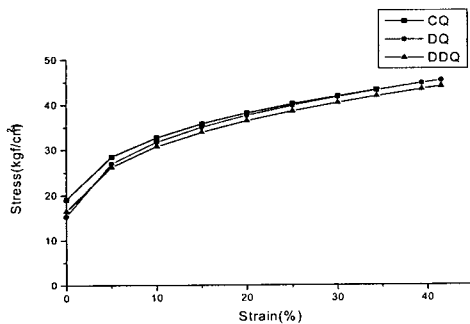


Fig. 3 The curve of true stress - true strain

#### 3.2 정사각컵 디프드로잉 실험

##### 3.2.1 에칭작업

시편의 가장자리 버어를 제거하고 알코올로 깨끗이 세척한 후 원형 그리드 스텐실판을 시편의 위에 얹고 에칭액(53NC electrolyte)을 충분히 부은 다음 롤러전극을 에칭액이 시편에 충분히 작용할 수 있도록 15-20초 간 왕복하여 문지른다. 에칭작업이 완료된 시편은 물로 깨끗이 세척하고 드라이어로 물기를 충분히 말린다.

##### 3.2.2 정사각컵 디프드로잉 실험

###### 1) 실험

BHF(Blank Holding Force) 8ton에 대해 드로잉 깊이 40mm와 24mm의 조건으로 시험하였고, 펀치속도는 100mm/min.로 하고 윤활은 NP-9를 사용하였다. Fig. 4는 정사각컵 디프드로잉 제품을 나타낸 것이다.

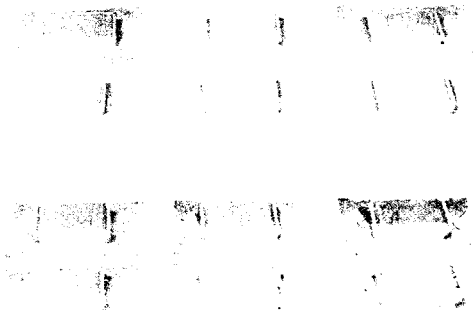


Fig. 4 The square cups after forming

###### 2) 측정

성형실험을 완료한 시편에 대한 변형률의 측정은 평면부에 대해서는 원형그리드 측정기로 행하였고, 곡면부분의 변형률 측정에는 마일러테이프(mylor tape)를 사용하였다. 마일러테이프의 사용방법은 Fig. 5에서와 같이 테이프에 표시된 선의 위·아랫부분에 그리드를 일치시켜 표시된 값을 읽으면 그것이 바로 변형률(%)이다. 이 때의 변형률은 공칭변형률이므로 진변형률로 변환시켜야 한다.

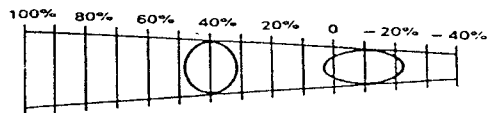


Fig. 5 Grid measuring using mylor tape

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 성형하중과 두께변형률 분포

Fig. 6은 BHF 8톤, 펀치행정 24mm일 때의 실험과 유한요소 해석에 의한 3가지의 재료인 CQ, DQ, DDQ에 대한 성형하중과 펀치행정과의 관계를 표시한 것으로, 재료에 따라 성형하중이 약간의 차이를 나타내고 있는 것을 볼 수 있는데, CQ가 가

장 큰 값을 나타내고, 그 다음으로 DQ, DDQ의 순서를 보이고 있다. 또, 실험값과 유한요소해석 결과를 비교하여 보면 전반적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

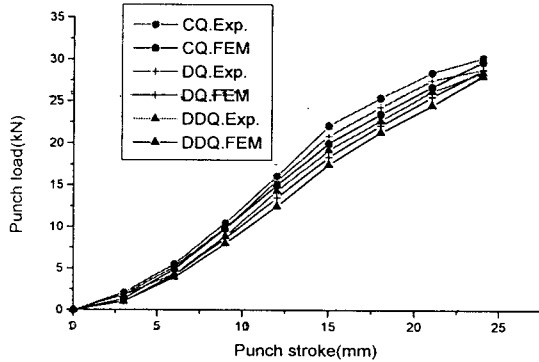


Fig. 6 Relationship between punch loads and punch stroke for CQ, DQ and DDQ

Fig. 7과 Fig. 8은 CQ 재료에 대해 BHF 8톤, 펀치행정 40mm 일 때의 펀치 중심에서 모서리부와 직변부로의 각 위치에 따른 두께변형을 변화를 나타낸 것으로, 모서리부 두께변형률의 변화가 직변부의 변화율 보다 훨씬 크게 나타나고 있다. 이는 모서리부의 재료가 직변부에 비해 더 큰 드로잉응력을 받으면서 소성변형을 일으키기 때문으로 추측된다. 또한, 각각에 대해서도 실험과 유한요소해석에 의한 결과를 서로 비교해 보면 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있고, 펀치와 다이 사이의 클리어런스부에서 아주 큰 두께 감소를 나타내고 있는데, Fig. 9에서 보는 바와 같이 그 부위에서 응력이 집중되어 네킹이 발생함을 보이는 것이다. 실제 성형된 제품에서도 펀치어깨부에서 네킹현상이 발생된 것을 볼 수 있었다.

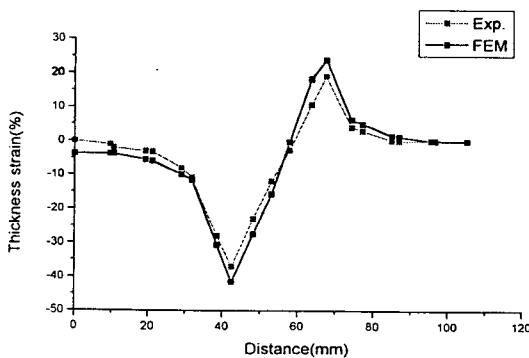


Fig. 7 Variation of thickness strain with distance at the corner section

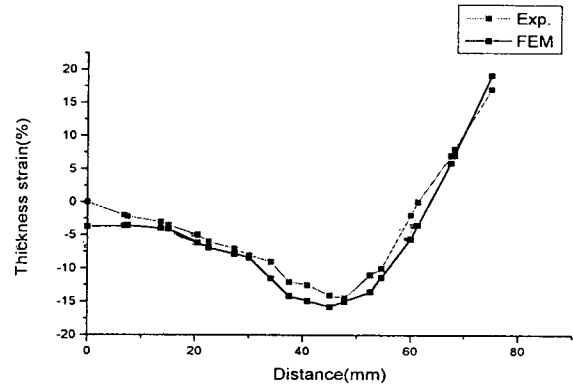


Fig. 8 Variation of thickness strain with distance at the straight section

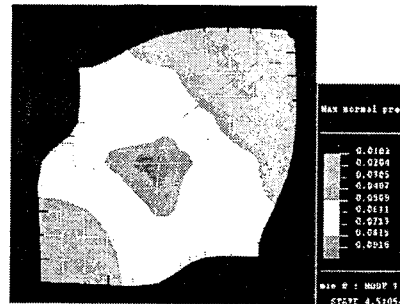


Fig. 9 Stress distribution for CQ under BHF of 8ton

한편, 재료의 바깥부분에서는 모서리부의 두께는 감소하고, 상대적으로 직변부는 두께가 증대되어짐을 볼 수 있는데, 이것은 정사각컵이 드로잉되면서 다이의 모서리부에서 재료의 유입이 늦어짐에 따라 모서리부의 잉여 소재가 직변부로 밀려나는 영향, 즉, 직변부가 모서리부에 대해 완화작용을 하는 것으로 볼 수 있다.

#### 4.2 펀치와 다이의 모서리반경에 따른 영향

Fig. 10, Fig. 11은 DDQ 재료에 대하여 BHF 8톤, 마찰계수  $\mu_D$ 가 0.15,  $\mu_P$ 가 0.25에서의 다이와 펀치의 모서리반경에 따른 성형시간에 대한 성형하중의 관계를 나타내었다. 이러한 성형하중의 변화는 펀치와 다이의 모서리반경에 따라 그 값의 차이가 큰 것을 알 수 있었고, 펀치나 다이의 모서리반경이 작을수록 큰 성형하중이 필요함을 알 수 있다. 또한 다이 보다 펀치의 모서리반경이 성형하중에 미치는 영향이 더 큼을 볼 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 다이와 펀치의 형상반경에 따른 두께 변화의 분포를 정사각컵 중심에서 대각선방향으로 표시한 것을 보여주고 있다. 여기서 보면 두께변형률의 변화는 모서리반경이 4일 때 가장 크게 나타났고 모서리반경이 8일 때와 12일 때는 그다지 크지 않았다. 특히 펀치어깨부에서는 상당한 차이를 나타내었다.

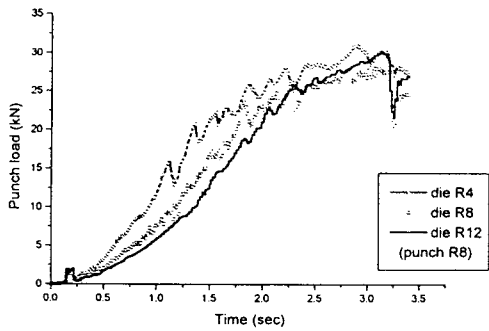


Fig. 10 Punch loads for various radius of die

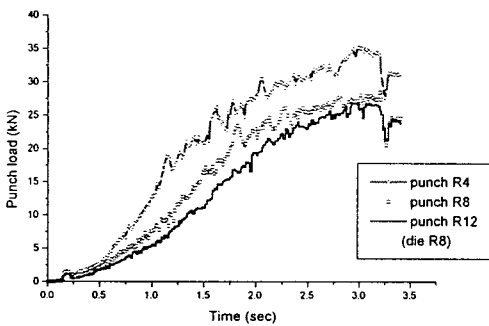


Fig. 11 Punch loads for various radius of punch

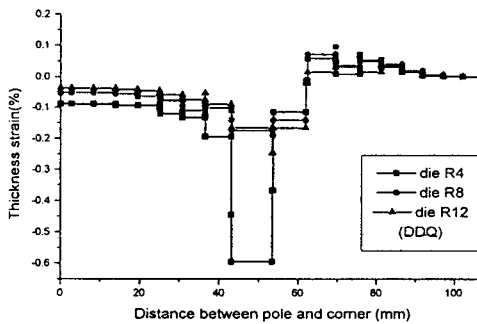


Fig. 12 Thickness strain for various radius of die

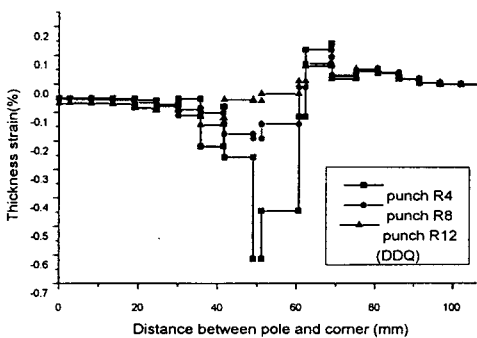


Fig. 13 Thickness strain for various radius of punch

이와 같은 결과는 정사각컵이 드로잉될 때 펀치와 다이의 모서리반경이 작아질수록 재료의 유입이 늦어져 잉여소재에 의한 드로잉저항이 커지기 때문인 것으로 생각되어진다.

#### 4.3 마찰계수의 변화에 따른 영향

Fig. 14는 재료 DDQ에 있어서 펀치와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_P$ 를 0.25로 두고 다리와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_D$ 를 0.1, 0.15, 0.2로 하였을 때의 펀치행정에 대한 성형하중의 분포를 나타낸 것이다. 여기에서 볼 때 다리와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_D$ 가 커질수록 성형하중도 더 커짐을 볼 수 있다.

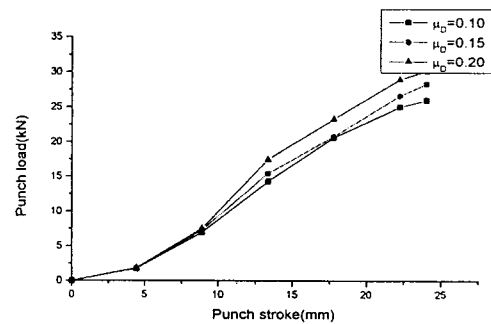


Fig. 14 Variation of punch loads with punch stroke for friction coefficient  $\mu_D$

Fig. 15는 재료 DDQ에 대해  $\mu_D$ 를 0.15로 하고 펀치와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_P$ 를 0.2, 0.25, 0.3으로 하였을 때 성형하중과 펀치행정 사이의 관계이다. 여기서 보면 성형하중의 크기는 펀치행정이 증가할수록 증가하고  $\mu_P$ 에는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

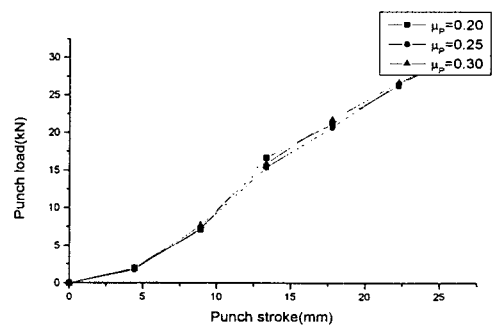


Fig. 15 Variation of punch loads with punch stroke for friction coefficient  $\mu_P$

Fig. 16은 재질 DDQ에 있어서 펀치와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_P$ 를 0.25로 일정하게 두고 다리와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_D$ 를 0.1, 0.15, 0.2로 하였을 때 위치에 따른 두께변형률을 나타낸 것으로 다리와 소재 사이의 마찰계수  $\mu_D$ 가 작을수록 위치에 따른 두께변형률은 약간 크게 나타났다.

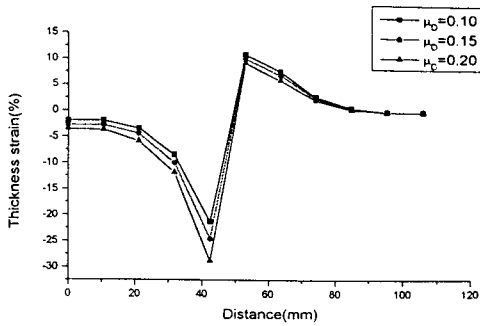


Fig. 16 Variation of thickness strain with distance for various friction coefficient  $\mu_D$

Fig. 17은 재질 DDQ에 있어서 다이와 블랭크 사이의 마찰계수인  $\mu_D$ 를 0.15로 두고 펀치와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_P$ 를 0.2, 0.25, 0.3으로 두었을 경우 위치에 따른 두께변형률의 변화를 나타낸 것으로 펀치운곽부까지는  $\mu_P$ 가 클수록 두께변형률이 약간 크게 나타났으나 이후는  $\mu_P$ 의 크기에 무관함을 보여 준다.

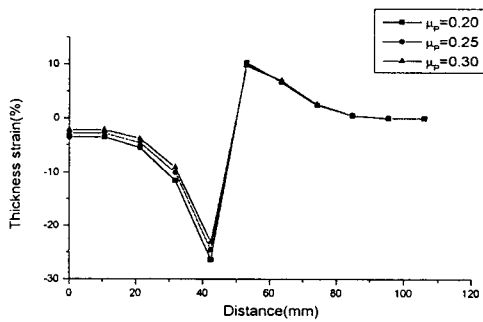


Fig. 17 Variation of thickness strain with distance for various friction coefficient  $\mu_P$

### 5. 결 론

유한요소법을 디프드로잉 문제에 적용하여 해석한 결과를 CQ, DQ 및 DDQ의 재료를 이용한 실험값과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) CQ, DQ 및 DDQ에 대한 펀치행정에 따른 성형하중과의 관계는 대략 CQ, DQ, DDQ의 순서로 나타났고, 두께변형률의

분포는 DDQ, DQ, CQ의 순서로 나타났다.

(2) 디프드로잉 성형 후의 두께변형률 분포에 있어 모서리부 두께변형률의 변화가 직변부의 두께변형률 변화보다 크게 나타났고 해석치는 실험치와 잘 일치하였다.

(3) 펀치와 다이의 모서리반경에 따른 성형하중을 해석한 결과 펀치와 다이의 모서리반경이 작을수록 성형하중이 크게 나타났고, 또 다이 보다는 펀치의 모서리반경이 성형하중에 더 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

(4) 펀치와 다이의 모서리반경에 따른 두께변형률의 변화는 모서리반경이 4일 때 가장 크게 나타났고 모서리반경이 8일 때와 12일 때는 그다지 크지 않았다. 특히 펀치어깨부에서는 상당한 차이를 나타내었다.

(5) 성형하중에 대한 마찰의 영향은 다이와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_D$ 가 클수록 크게 나타났고 펀치와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_P$ 에는 거의 영향이 없는 것으로 해석되어졌다.

(6) 두께변형률에 대한 마찰의 영향은 다이와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_D$ 가 작을수록 두께변형률은 크게 나타났고 펀치운곽부까지는 펀치와 블랭크 사이의 마찰계수  $\mu_P$ 가 클수록 두께변형률이 약간 크게 나타났으나 이후는  $\mu_P$ 의 크기에 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

Chiang, D. C. and Kobayashi, S.(1966). "The Effect of Anisotropy and Work-hardening Characteristics in the Stress and Strain Distribution in Deep Drawing", J. of Eng. for Ind. Trans. ASME. Vol. 88, pp 443~448.

Hasek, V. and Lange, K.(1979). Proc. 7th NAMRC ASME 65.

Hill, R.(1950). "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford University Press.

Kim, J. H., Oh, S. I. and Kobayashi, S.(1978). "Analysis of Stretching Sheet Metals with Hemispherical Punch", Int. J. Mech. Sci. Vol. 18, pp 209.

Shim, H. B. and Yang, D. Y.(1994). "Elastic- Plastic Finite Element Analysis of Deep Drawings of Circular and Square Cups Considering Bending".

2000년 7월 6일 원고 접수

2000년 10월 30일 수정본 채택