

박판 성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용

양동열* · 이상욱** · 윤정환*** · 유동진****

(1998년 7월 1일 접수)

Springback Analyses in Sheet Metal Stamping Processes and Industrial Applications

Dong-Yol Yang, Sang-Wook Lee, Jeong-Whan Yoon and Dong-Jin Yoo

Abstract

The explicit and implicit time integration methods are applied effectively to analyze sheet metal stamping processes, which include the forming stage and the springback stage consecutively. The explicit time integration method has better merits in the forming stage including highly complicated three-dimensional contact conditions. By contrary, the implicit time integration method is better for analyzing springback since the complicated contact conditions are removed and the computing time to get the final static state is short. In this work, brief descriptions of the formulation and the factor study for springback simulations are presented. Further, the simulated results for the S-rail and the roof panel stamping processes are shown and discussed.

Key Words : Sheet Metal Stamping, Springback, Taguchi Method, Explicit Finite Element Method

1. 서론

박판 성형 공정에 있어서 스프링백 문제는 제품이 더욱 정교해지고 복잡해짐에 따라 그 비중이 날로 커지고 있다. 스프링백에 의해 발생하는 치수 오차가 부가적인 수정 공정을 요구하는 경우가 많으므로 미리 수치적인 방법으로 스프링백 해석을 수행하여 문제점을 발견함으로써 더욱 효율적인 금형 설계가 가능해진다.

수치적 방법으로서 최근에 유한 요소법(FEM)이 많이 적용되고 있다. 스프링백 현상이, 박판이 성형된 후 박판 내부의 응력이 탄성적으로 재분배(redistribution)되면서

생겨나는 현상인 만큼 탄성 변형율을 고려하는 탄소성 유한 요소법의 채택이 필수적이다. 또한 유한 요소 형태는 박판의 특징을 잘 반영할 수 있는 쉘(shell) 요소가 적당하다. 시간 적분법으로는 성형 공정 해석에는 외연적(explicit) 방법을, 스프링백 해석에는 내연적(implicit) 방법을 채택하는 데, 이렇게 함으로써 계산 효율을 극대화시킬 수 있기 때문이다.⁽¹⁾

본 논문에서는, 스프링백 현상을 유한 요소법으로 해석하는 방법 및 유한 요소 모델링 인자가 스프링백 양에 미치는 영향을 간략히 설명하고, 자동차용 패널을 포함한 두 가지 응용 예에 대해 기술하고 토의한다.

* 한국과학기술원 기계공학과

** 삼성중공업 연구소

*** Alcoa Technical Center, PA, USA

**** 기아자동차 설계연구부

2. 본 론

2.1 성형 및 스프링백 해석에 대한 수식화

가상일의 원리(principle of the virtual work)로부터 동적 힘 평형식은 다음과 같이 유도된다.⁽²⁾

$$M\ddot{d} + R^{int} = R^{ext} \quad (1)$$

왼쪽 변의 첫째항은 관성력(inertial force)을, R^{int} 는 내력(internal force)을, R^{ext} 는 외력(external force)을 나타낸다. 질량 행렬 M 을 집중화 시키고,⁽²⁾ 다음의 중간 차분법(central difference method)을 사용하면 식(1)은 축차(iteration)없이 외연적으로 적분될 수 있다.

$$\dot{d}^{(i+1/2)} = \dot{d}^{(i-1/2)} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{d}^{(i)} \quad (2a)$$

$$d^{(i+1)} = d^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{d}^{(i+1/2)} \quad (2b)$$

축차없이 구한 해가 안정하기 위해서는 스텝(step)간 시간 증분이 임계 시간 증분(critical time increment) 이하이면 된다. 점성을 무시할 경우 임계 시간 증분은 다음과 같다.

$$\Delta t_c = L_s / C \quad (3)$$

여기서 L_s 는 유한 요소의 특성 길이(characteristic length)이고 C 는 응력 전파 속도(stress wave speed)이다.

박판의 성형 공정에 대한 해석은 식(1)에 의해 이루어 지지만, 스프링백 해석시에는 ♦탄성 회복 ♦외력 없음 ♦정적 평형 상태라는 스프링백의 특징을 반영하여 다음과 같은 지배 방정식을 사용하여 계산한다.

$$R^{int} = 0 \quad (4)$$

위식은 일반적으로 변위에 대해 비선형 방정식이므로 이를 다음과 같이 테일러 시리즈(Taylor series)로 선형화 시켜서 축차를 통해 해를 계산한다.

$$\frac{\partial R^{int}}{\partial d} \Delta d = -R^{int} \quad (5)$$

여기서 $\partial R^{int} / \partial d$ 는 강성 행렬(stiffness matrix)이다. 수렴(convergence)의 판정은

$$\frac{\|\Delta d\|}{\|d\|} \leq \epsilon \quad (6)$$

로 하며 ϵ 은 보통 10^{-5} 정도이다.

2.2 모델링 인자가 스프링백에 미치는 영향

스프링백 형상 및 양을 결정하는 인자는 매우 다양하다. 특히, 해석하고자 하는 문제가 잘 정의되어있다 하더라도 주어진 문제를 어떤 식으로 모델링 하느냐, 즉 수치적 인자들(numerical factors)을 어떻게 설정하느냐에 따라서도 스프링백 해석 결과가 다양하게 나타난다. 여기서는 다음의 다섯가지 인자와 그 수준을 대표적으로 선택하였다.

- ① Contact Damping Parameter (CDP)⁽³⁾: 0.01, 0.05, 0.25
- ② Penalty Parameter (PP): 0.01, 0.05, 0.1
- ③ Blank Element Size (BES): 0.5 mm, 1 mm, 2 mm
- ④ Number of Corner Element (NCE): 20 ea., 10 ea., 5 ea.
- ⑤ Punch Velocity (PV): 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s

위의 인자중에서 ①과 ②는 접촉 처리와 관련 있고, ③과 ④는 판재 및 금형의 정밀 묘사와 관련 있으며, ⑤는 동적 효과(dynamic effect)와 관련이 있다.

이들 다섯가지의 수치적 인자들이 스프링백에 미치는 영향을 살펴보기 위해 NUMISHEET'93⁽⁴⁾의 벤치마크

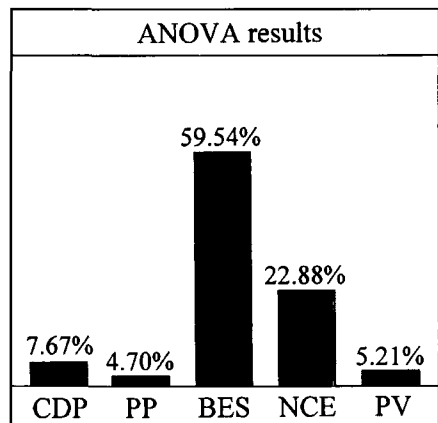


Fig. 1 Effects of the numerical factors influencing springback

문제인 U-draw bending 문제를 사용하고, 다꾸치법 및 분산 분석(Analysis of variance)기법을 도입하여 각 인자들에 대해 종합적이고 정량적인 평가를 시도하였다.

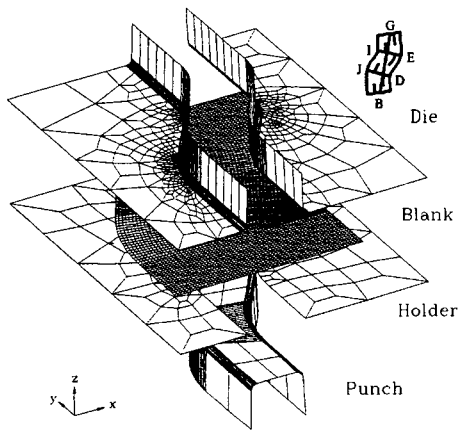
Fig.1에 각 인자들이 스프링백에 미치는 영향력의 정도를 백분율로 나타내었다. 영향력이 큰 주요 인자로는 판재와 금형의 정밀 묘사와 관련된 BES 및 NCE임을 알 수 있다. 따라서 스프링백을 잘 예측하기 위해서는 무엇보다도 기하학적 형상(geometry)이 정밀하게 표현되어야 한다고 결론 내릴 수 있다. 또 한가지 주목해야 할 것은 동적 효과와 직결되어 있는 PV인자가 스프링백에 미치는

영향이 그리 크지 않다는 점이다. 따라서 성형 공정을 외연적 방법으로 해석하고, 스프링백 공정을 내연적 방법으로 해석하는 현재의 방법이 타당성을 가진다고 볼 수 있다. 더욱 자세한 평가 과정 및 결과는 문헌5를 참고하면 된다.

2.3 S-rail 성형 및 스프링백 해석

S-rail 성형 해석은 NUMISHEET'96⁶⁾의 벤치 마크 문제이다. Fig.2에 유한 요소 모델링된 금형 및 판재의 모양을 보였다. S자형으로 된 금형에 의해 판재가 성형된 후 Fig.2에 표시된 바와 같은 IE, JD 및 BG 단면선을 따라 스프링백 후의 형상이 실험 결과와 비교된다. 또한, 성형 단계는 외연적 방법, 스프링백 단계는 내연적 방법으로 해석한 결과를 검증하기 위해 성형 및 스프링백 단계 모두를 내연적 방법만으로 해석한 결과⁷⁾와도 비교한다. 판재의 재료로는 AL6111-T4를 사용하였고, BHF(Blank Holding Force)는 10kN을 적용하였다.

Fig.3에 스프링백 전후의 변형 형상을 보였다. 스프링백 되면서 플랜지 부위가 벌어지면서 약간 비틀어 진 것을 관찰할 수 있다. 이를 자세히 보기 위해 Fig.4에 IE 및 JD 단면선을 따른, 스프링백 전후의 단면 형상의 변화를 실험 결과⁸⁾와 함께 표시하였다. 성형된 판재의 머리부분이 기울어져 보이는 것은 그 부위에 주름(wrinkle)이 발생하였기 때문이다. 해석 결과는 실험 결과를 잘 예측하고 있다. 해석 결과가 실험 결과 보다 약간 작게 평가된 것은, 스프링백 결과에 가장 큰 영향을 미치는 판재의 유한 요소 크기가 금형의 코너 반경에 비해 상대적으로 컸기 때문인 것으로 사료된다.



	Die	Punch	Holder	Blank	Total
No. of Nodes	1,580	1,035	223	6,161	8,999
No. of Elements	1,496	968	190	6,000	8,654

Fig. 2 FE-discretized and exploded view of the S-rail stamping process

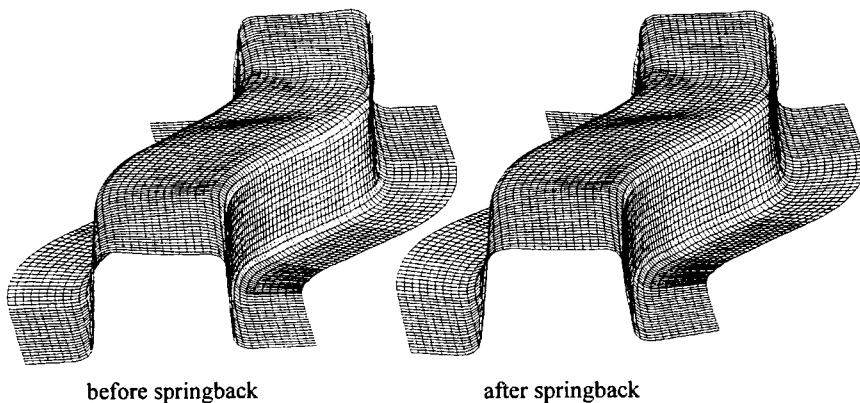


Fig. 3 Comparison of the deformed shapes of the blank before and after springback in the S-rail stamping process

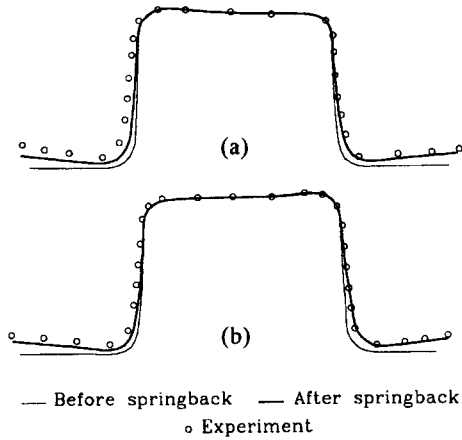


Fig. 4 Comparison of the cross-sectional shapes obtained by the present analysis and the experiment in the S-rail stamping process(Experiment⁽⁸⁾);(a) Along line IE, (b) Along line JD

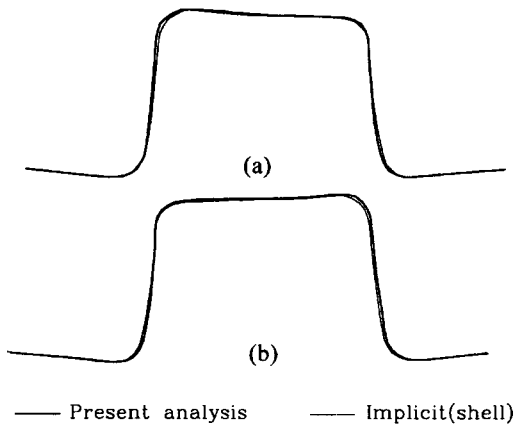


Fig. 5 Comparison of the cross-sectional shapes obtained by the present analysis and the static implicit analysis in the S-rail stamping process(Implicit(shell)⁽⁷⁾);(a) Along line IE, (b) Along line JD

Fig.5에서 현재의 해석 결과를, 내연적 방법만으로 계산된 해석 결과와 비교하였다. 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 IE 및 JD 단면에 있어서의 주변형률(major principal strain), 부변형률(minor principal strain) 및 두께 변형률 분포도 현재의 해석 결과와 내연적 방법만으로 계산된 결과와 매우 잘 일치하였다.⁽⁵⁾ 따라서 외연적 및 내연적 방법을 함께 사용하는 현재의 방법이 타당성이 있음이 확인되었다.

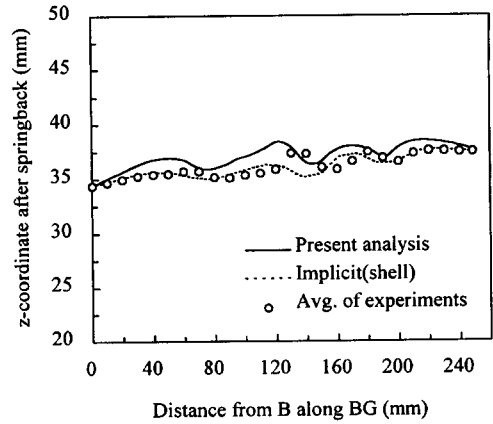


Fig. 6 Comparison of the cross-sectional shapes along the line BG obtained by the present analysis, the static implicit analysis and the average of the experiments in the S-rail stamping process(Implicit(shell)⁽⁷⁾, Avg. of experiments⁽⁶⁾)

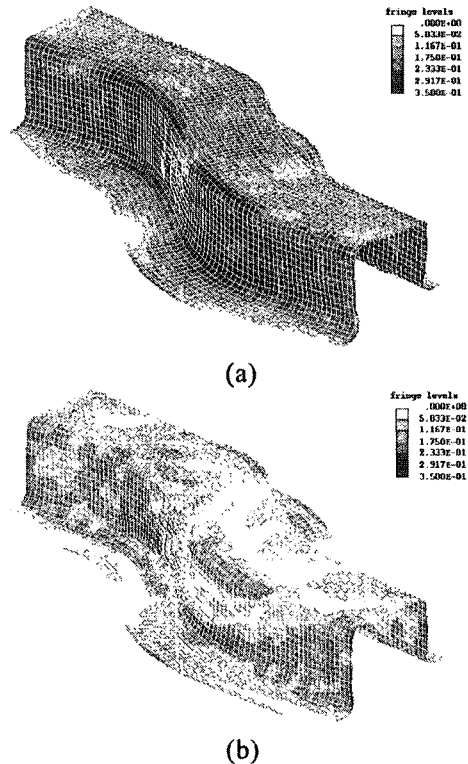
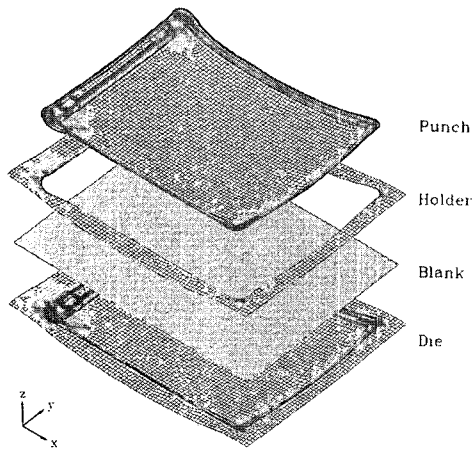


Fig. 7 Effective stress distributions on the outer layer of the S-rail blank(unit:GPa);(a) Before springback, (b) After springback



(a half modeling)

	Die	Punch	Holder	Blank	Total
No. of Nodes	10,113	9,042	1,254	7,830	28,239
No. of Elements	10,269	9,168	1,101	7,632	28,170

Fig. 8 FE-discretized and exploded view of the roof panel stamping process

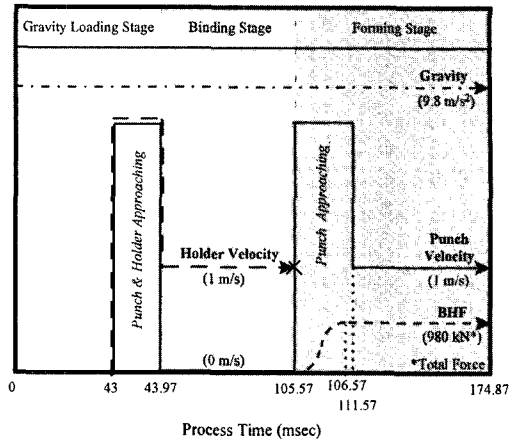


Fig. 9 Time schedule for the simulation of the roof panel stamping process

Fig.6에는 BG 단면선을 따른 단면 형상을 보였다. 주름이 발생한 것을 관찰할 수 있다. 현재의 해석 결과는 주름을 실험 결과 보다 약간 크게 예측하고 있음을 볼 수 있다.

Fig.7은 스프링백 전후의 유효 응력 분포도를 보여주고 있다. 동일 척도를 사용하여 나타내었기 때문에 농도의

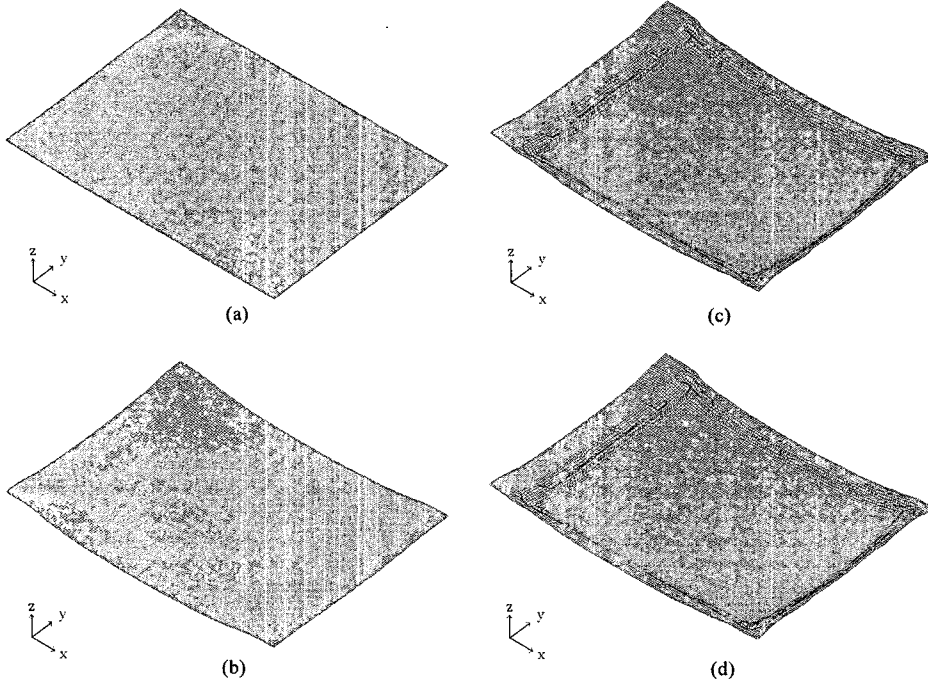


Fig. 10 Deformed shapes in the roof panel stamping process after; (a) Gravity loading stage, (b) Binding stage, (c) Forming stage, (d) Springback stage

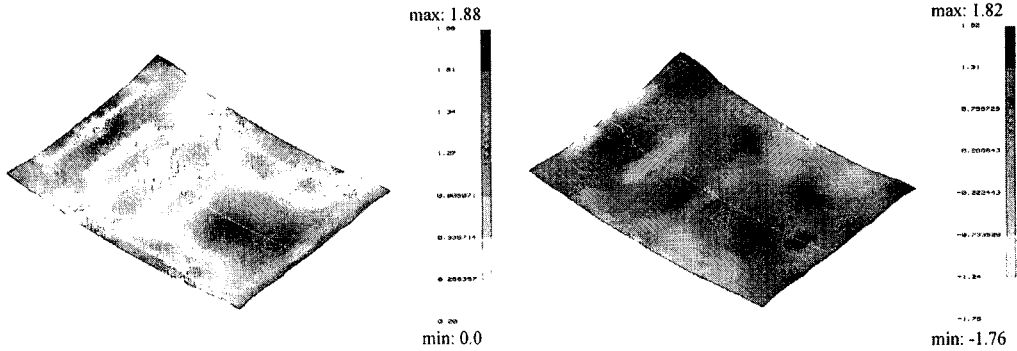


Fig. 11 Displacement distributions during springback in the roof panel stamping process(unit: mm);
(a) Absolute nodal displacement, (b) z-component of nodal displacement

변화가 끝 응력의 변화가 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 스프링백 동안 응력이 전체적으로 상당히 완화(stress relief)된 것을 볼 수 있다.

2.4 루프 패널(roof panel) 성형 및 스프링백 해석

실제 산업 예제로서 루프 패널 성형 및 스프링백 해석을 수행하였다. 이 공정은 기아자동차에서 개발된 해치백 스타일의 자동차용 루프 패널을 생산하기 위한 공정이다.

Fig.8은 루프 패널 성형 공정의 유한 요소 모델링된 모습이다.

루프 패널 성형 공정을 해석하기 위한 해석 스케줄링을 Fig.9에 도시하였다. 성형 해석은 세단계로 이루어진다. 즉, 자중 해석, 바인딩(binding) 해석 및 성형 해석이다. 성형 해석 후에는 곧 바로 스프링백 해석이 이루어진다.

단계별 해석 결과를 Fig.10에 나타내었다. 판재의 크기에 비해 스프링백 양이 작아서 Fig.10으로는 스프링백 양을 확인하기 어렵기 때문에 Fig.11에 스프링백 양에 대한 분포도를 보였다. 절점에서의 절대 변위 분포도와 변위의 z방향 성분 분포도가 거의 일치하는 것을 볼 때, z방향 변위가 스프링백 양을 지배함을 알 수 있다. z방향 스프링백 양의 최대 변동량은 3.58 mm였다.

3. 결 론

(i) 박판에 대한 스프링백 해석을 수행함에 있어서 성형 공정은 외연적 유한 요소법으로, 스프링백 해석은 내연적 유한 요소법으로 행함으로써, 계산 효율을 높일 수 있었다. 이때 동적 효과가 스프링백 결과에 미치는 영향은 별로 크지 않았다.

(ii) 스프링백 결과에 가장 큰 영향을 주는 인자는 판재의 유한 요소 크기였다. 그 다음으로는 금형의 코너를 묘사하는 유한 요소의 개수였다. 이로부터, 스프링백을 잘 예측하기 위해서는 기하학적 형상을 정밀하게 모델링해야 함을 알 수 있었다.

(iii) S-rail 성형 및 스프링백 해석을 통해서 본 해석 방법에 의한 계산 결과가 실험 값 및 내연적 방법 만에 의한 계산 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 이로부터, 본 방법의 타당성이 검증되었다.

(iv) 실제 산업 예제인 루프 패널 성형 및 스프링백 해석을 성공적으로 수행하였고, 이를 통해 본 방법이 일반적으로 적용될 수 있음이 확인되었다.

참 고 문 헌

- (1) 이상욱, 윤정환, 양동열, 1996, "외연적 시간 적분법을 이용한 박판 성형 및 내연적 스프링백 해석", 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 647~652.
- (2) S.W.Lee, J.W.Yoon and D.Y.Yang, 1996, "Explicit Finite Element Analysis of Industrial Sheet Metal Forming Processes", Proceedings of the Pacific Conference on Manufacturing '96, edited by Korea Association of Machinery Industry, Seoul, Korea, pp. 578~583.
- (3) 이상욱, 양동열, 정완진, 1997, "판재 성형에 미치는 damping의 영향 고찰", 한국소성가공학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 188~191.
- (4) Committee of NUMISHEET'93, 1993, Proceedings of the 2nd International Conference

NUMISHEET'93, edited by A.Makinouchi, E.Nakamachi, E.Odate and R.H.Wagoner, Isehara, Japan.

- (5) 이상욱, 1998, "탄소성 외연적 유한 요소 수식화 및 스프링백이 고려된 박판 성형 공정에서의 적용", 한국과학기술원 박사 학위 논문.
- (6) Committee of NUMISHEET'96, 1996, Proceedings of the 3rd International Conference NUMISHEET'96, edited by J.K.Lee, G.L.Kinzel

and R.H.Wagoner, Ohio State Univ., USA.

- (7) 윤정환, 1997, "변형 증분 이론을 이용한 평면 이방성 재료의 박판 성형 유한 요소 수식화", 한국과학기술원 박사 학위 논문.
- (8) J.F.Duarte, A.B.Rocha, 1996, "A Brief Description of a S-rail Benchmark", Proceedings of NUMISHEET'96, edited by J.K.Lee, G.L.Kinzel and R.H.Wagoner, Ohio State Univ., USA, pp. 336~343.