[논문] 한국소성가공학회지, 제 15 권 제 8 호, 2006
Transactions of Materials Processing, Vol.15, No.8, 2006

용접부의 영향을 고려한 하이드로포밍된 자동차용 DP강관의 충돌 특성 평가

정경환[1] · 정관수[#] · 권혁선[2] · 박성호[2] · 노동성[3]

Crash Performance Evaluation of Hydro-formed Automotive DP-Steel Tube Considering Welding Heat Effects

K. H. Chung, K. Chung, H. S. Kwon, S. H. Park, D. S. Ro

(Received October 12, 2006)

Abstract

In order to numerically evaluate automotive hydro-formed DP-steel tubes on crash performance considering welding heat effects, the finite element simulations of crash behavior were performed for hydro-formed tubes with and without heat treatment effects. This work involves the mechanical characterization of the base material and the MAG-welded zone as well as finite element simulations of the crash test of hydro-formed tubes with welded brackets and hydro-forming of tubes. The welding heat effects on the crash performance are evaluated in efforts to improve the process optimization procedure of the engine cradle in the design stage. In particular, FEM simulations on indentations have been performed and experimentally verified for material properties of weld zone and heat affected zone.

Key Words : Dual Phase Steel, Engine Cradle, Anisotropic Yield Function, Strain Rate Sensitivity, MAG-weld, Hydro-Forming, Crash Simulation

1. 서 론

최근 환경오염에 대한 규제강화에 따라 자동차산업에서 알루미늄 합금이나 DP강과 같은 경량화 소재를 사용한 자동차부품 개발의 노력이 활발하다. 특히 DP 강관의 경우, 하이드로포밍(hydro-forming) 공정을 통해 엔진 크래들(engine cradle)에 적용될 수 있으며, 완성된 엔진 크래들은 차체와의 결합을 위해 브래킷(braket)이 MAG 용접된다. 일반적으로 용접부의 물성은 용접열에 의해 모재와 다르게 변화하며, 이를 고려한 자동차 구조재의 충돌 특성 평가는 제품 형상의 최적화를 위해 매우 중요하다.

이에 본 연구에서는 용접열 영향에 따른 물성 변화를 고려하여 엔진크래들의 충돌 특성을 수치 해석을 통해 평가했으며, 모재인 DP 강의 비등방성 및 변형률 민감도 또한 고려되었다. 특히, 엔진 크래들의 성형 공정을 선형 강관의 하이드로포밍으로 전산모사했으며, 판재의 MAG 용접부는 연속압입법에 의한 경도 시험과 이를 모사하는 유한요소해석에 의하여 물성 평가가 되었다.

1. 서울대학교 재료공학부
2. POSCO 기술연구소 자동차가공 연구그룹
3. ㈜프론틱스
교신저자: 서울대학교 재료공학부, 지능형 텍스타일시스템 연구센터
E-mail: kchung@snu.ac.kr

2. 이 론

2.1 항복 함수

DP 강 판재의 초기 비등방 항복 응력 곡면을 모사하기 위해 Barlat 등에 의해서 개발된 항복함수 Yld2000-2d[1]이 고려되었다. 이 함수는 평면응력 하에서 정의되며, 그 형태는 다음과 같다.

$$f^{\frac{1}{M}} = \left\{\frac{\Phi}{2}\right\}^{\frac{1}{M}} = \bar{\sigma} \qquad (1)$$
$$\Phi = \left|\tilde{S}'_I - \tilde{S}'_{II}\right|^M + \left|2\tilde{S}''_I + \tilde{S}''_{II}\right|^M + \left|\tilde{S}''_I + 2\tilde{S}''_{II}\right|^M$$

식(1)에서 $\bar{\sigma}$ 는 유효 응력(effective stress)이며, $\tilde{S}'_k$ 와 $\tilde{S}''_k$ ($k = I, II$)는 각각 $\tilde{\mathbf{s}}'$ 와 $\tilde{\mathbf{s}}''$ 의 주축값(principal value)이며, $\tilde{\mathbf{s}}$ ($\tilde{\mathbf{s}}'$ or $\tilde{\mathbf{s}}''$)는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \tilde{s}_{xx} & \tilde{s}_{xy} \\ \tilde{s}_{xy} & \tilde{s}_{yy} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \tilde{s}_{xx} \\ \tilde{s}_{yy} \\ \tilde{s}_{xy} \end{bmatrix}$$
$$\hat{\mathbf{s}}' = \mathbf{C}' \cdot \mathbf{s} = \mathbf{C}' \cdot \mathbf{T} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{L}' \cdot \boldsymbol{\sigma} \qquad (2)$$
$$\hat{\mathbf{s}}'' = \mathbf{C}'' \cdot \mathbf{s} = \mathbf{C}'' \cdot \mathbf{T} \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{L}'' \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

여기에서 $\mathbf{C}'$ 와 $\mathbf{C}''$ 는 (따라서 $\mathbf{L}'$ 와 $\mathbf{L}''$) 비등방 계수를 포함하는 행렬이고 $\mathbf{T}$ 는 코시(Cauchy) 응력텐서 $\boldsymbol{\sigma}$ 와 데비에이터 응력 텐서 $\mathbf{s}$ 의 선형 변환 행렬이다. 비등방 계수를 포함하는 선형 변환 행렬은 아래와 같으며,

$$\mathbf{C}' = \begin{bmatrix} c'_{11} & c'_{12} & 0 \\ c'_{21} & c'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c'_{66} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}'' = \begin{bmatrix} c''_{11} & c''_{12} & 0 \\ c''_{21} & c''_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c''_{66} \end{bmatrix} \qquad (3)$$

10개의 비등방 계수를 가지고 있으나, 8개 만이 독립적으로 유효하다.

2.2 전산 모사를 위한 정식화

수치 해석을 위한 정식화에서는 변형 형상의 이산화된 단계 사이의 변형 경로에 대한 가정이 필요하다. 그 중에서 변형 경로를 비례(propotional) 진(true) 또는 로그(logarithmic) 변형을 가정하는 것은 수치 정식화하는데 편리함을 주며, 이는 증분 변형 이론(incremental deformation theory) [2]에 기초하고 있다. 변형 증분 이론에 따라 주어진 변형 증분 $\Delta\varepsilon$ 에 대하여, 경화 규칙 및 주어진 항복함수를 이용하여 응력의 증분을 구할 수 있으며, 미지수가 $\Delta\bar{\varepsilon}$ 인 아래의 비선형 방정식이 얻어지게 된다.

$$f^{\frac{1}{M}}(\boldsymbol{\sigma}_0 + \Delta\boldsymbol{\sigma}) = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_0 + \Delta\bar{\varepsilon},\ \frac{\Delta\bar{\varepsilon}}{\Delta t}) \qquad (4)$$

이 식의 첨자 '0'은 초기상태를 의미하여, 유효 응력값은 경화곡선 $\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}})$ 에서 구할 수 있다.

3. 소재 물성 평가

3.1 DP590 판재

두께가 2.0mm 인 DP590 판재에서 일축 인장 축과 압연 방향과의 각도가 0°, 45°, 90°인 ASTM E 8M subsize 시편을 추출하여 일축 인장 시험과 R-value 측정시험을 수행한 결과로부터 구한 Yld2000-2d 의 이방성 계수를 Table 1 에 정리했다.

Table 1 Anisotropic coefficients of Yld2000-2d

M	c'_{11}	c'_{22}	c'_{66}	c''_{11}
6.0	0.936	1.036	1.022	1.026
	c''_{12}	c''_{21}	c''_{22}	c''_{66}
	0.002	-0.016	0.988	1.043

또한, Fig. 1 에 나타난 변형률 속도를 1, 10, 100, 200s^{-1} 으로 달리한 고속인장시험의 결과로부터 $\sigma = C\dot{\varepsilon}^m$ 과 같은 경화식의 변형률 속도 민감도 m 의 평균값 0.0145 가 계산되었다.

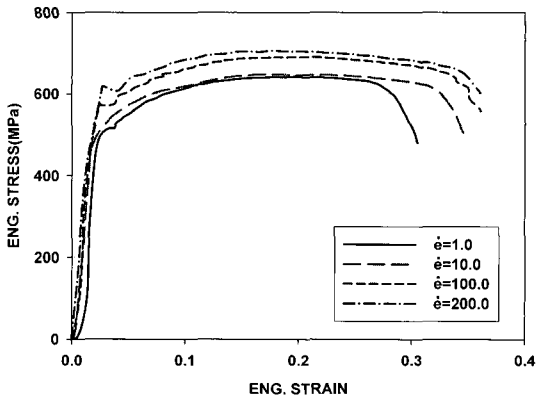

Fig. 1 Engineering stress-strain curves for various strain-rate levels of DP590 sheet

3.2 DP590 관

Fig. 2 와 같이 전기저항 용접(Electric resistance welding)된 용접선(weld seam)을 기준으로 원주방향으로 45°간격으로 ASTM 8E subsize 시편을 추출한 후, 일축인장시험을 수행하여 DP590 관의 부위별 물성을 측정하였다. 측정한 결과를 Hollomon 식 ($\bar{\sigma} = K(\bar{\varepsilon} + \varepsilon_0)^n$)으로 매개 변수화하여 Table 2 에 정리했다.

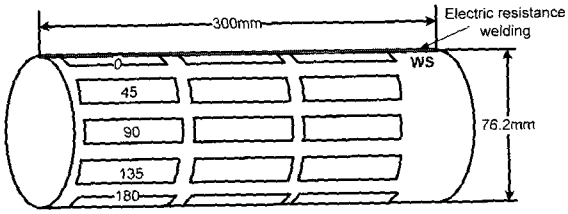

Fig. 2 Tensile specimens cut out from tubes at various positions

Table 2 Hardening parameters of DP590 tube

Material	n	K(MPa)	ε_0
Weld seam	0.067	927.8	0.0034
Tube base	0.222	1003.8	0.0378

한편, 용접선의 이방성은 없다고 간주하였으며, 판재와 같은 속도 민감도를 가진다고 가정했다. 또한, 용접선을 제외한 나머지 부위(tube base)의 물성은 앞으로의 검증 및 응용의 수치해석에서의 편리를 위해 평균하여 결정했으며, 이방성과 변형률 속도 민감도는 판재와 같다고 가정했다.

3.3 용접부 및 열영향부

용접선의 물성은 3.2절의 일축 인장 시험으로부터 구해지며, MAG용접부 및 열영향부의 물성은 연속압입법[3~4]에 의한 경도 시험과 이를 모사하는 유한 요소 해석에 의해 얻어진다. 일반적으로 연속압입법을 통해 구한 물성은 낮은 경화거동을 나타내기 때문에, 유한요소법을 이용한 수치해석을 통한 보정이 필요하다. Fig. 3과 같이 용접된 판재의 단면에 대하여 지름이 0.5mm인 구형 누름개(ball indenter)를 사용해 용접부 및 열영향부의 부위별로 압입 시험을 수행하여 하중-깊이 곡선을 구한다. 압입 시편의 비대칭성을 고려하여 용접부 및 3지점의 열영향부(HAZ-A,B,C)에 대해 각각 압입 시험을 수행했다. 압입 시험에 대한 수치 해석은 상용 유한 요소 프로그램인 ABAQUS /Standard[5]를 이용하고, 재료의 물성은 등방성이며 Hollomon식의 경화거동을 따른다고 가정했다. 압입 시험의 유한 요소 해석을 여러 경화 변수값 (K, n, ε_0)에 대해 실시했으며, 시험에 의한 하중-깊이 곡선과 잘 일치하는 경우의 경화 변수값을 해당 부위의 물성으로 결정했다. 용접부와 열영향부의 위치에 따른 물성을 Table 3에 정리했으며, Fig. 4은 위치에 따른 물성의 분포를 대략적으로 보여준다.

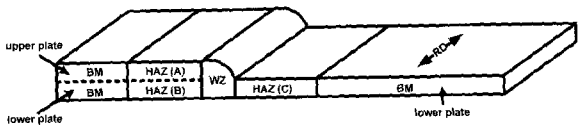

Fig. 3 Diagram of MAG-welded DP590 sheet

Table 3 Hardening parameters of MAG-weld zone (WZ) and heat affected zone(HAZ)

Material	Pos.* (mm)	n	K(MPa)	ε_0
Weld zone	0	0.18	1140	0.0013
Heat affected zone (HAZ-A)	4	0.16	840	0.012
	7	0.17	940	0.01
	10	0.16	980	0.013
	13	0.16	980	0.009
	16	0.16	960	0.01
Heat affected zone (HAZ-B)	4	0.2	900	0.003
	7	0.19	1000	0.011
	10	0.17	1000	0.013
	13	0.18	960	0.01
	16	0.19	980	0.009
Heat affected zone (HAZ-C)	5	0.16	820	0.009
	9	0.16	960	0.011
	12	0.14	960	0.01
	15	0.15	960	0.013
	18	0.15	950	0.01
	21	0.15	900	0.013
	24	0.2	980	0.013

*Positions away from the middle line of MAG-welded zone

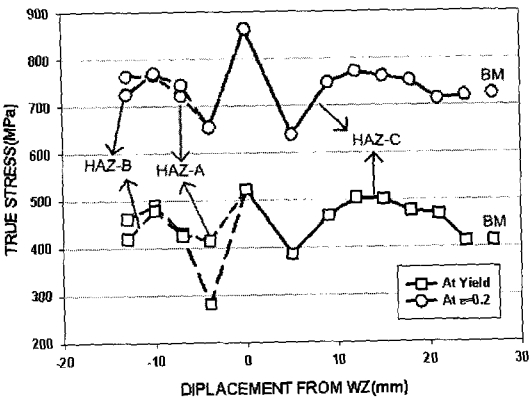

Fig. 4 Stress distributions for base material, MAG-weld zone and heat affected zone of DP590 sheet

3.4 물성검증

3.3절에서 구한 용접부 및 열영향부의 물성 검증을 위해 세로(longitudinal) 및 가로(transverse)방향 용접 시편의 일축 인장 시험과 3점 굽힘 시험을 수행했으며, 각각의 경우 Yld2000-2d를 구현하는 사용자 서브루틴(user subroutine)과 함께 ABAQUS /Standard를 이용한 유한 요소 해석의 결과와 비교하였다. 각각의 경우에 대해 유한 요소 해석에는 4 node shell element (S4R)를 사용하였으며, 특히 가로방향용접 시편의 경우 constraint옵션을 사용한 2 plate model을 사용했다. Fig. 5에 일축 인장 시험의 실험 및 유한 요소 해석에 의한 공칭 응력-변형율 곡선을 나타내었으며, Fig. 6에 3점 굽힘 시험의 실험 및 유한 요소 해석에 의한 펀치이동거리-펀치하중 곡선을 나타내었다. 모든 경우 실험 결과와 계산 결과가 비교적 잘 일치하여 용접부와 열영향부의 물성이 검증됨을 확인할 수 있었다.

다만, 세로 방향 용접 시편의 일축 인장 시험의 실험값을 보면 초기 변형율 부분에서 항복 연신(yield point elongation)이 나타나는데, 이는 주로 가열냉각(annealing)된 탄소강이나 DP 강등에서 나타나는 현상이다[5]. 본 연구에서는 용접시 발생한 열에 의해 용접부와 열영향부에서 항복 연신이 일어나는 것으로 판단되며, 유한 요소 해석에는 적용되지 않았다. 또한, 가로 방향 용접 시편의 일축 인장 시험의 경우, 탄성 영역에서의 경화 경사도가 세로 방향의 경우보다 낮게 나타나고 있다. 이는 가로 방향 시편의 두 plate 가 같은 평면상에 위치하지 않기 때문에, 인장 초기에 시편이

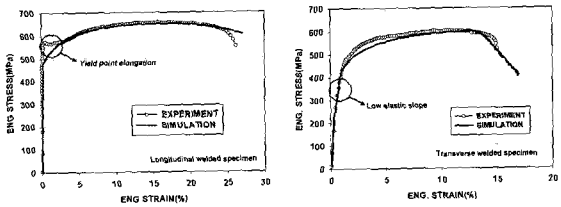

Fig. 5 Results for uni-axial tension tests of longitudinal & transverse welded specimen

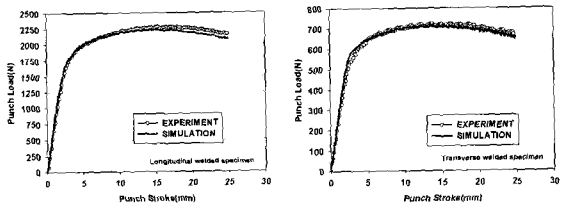

Fig. 6 Results for 3-point bending tests of longitudinal & transverse welded specimen

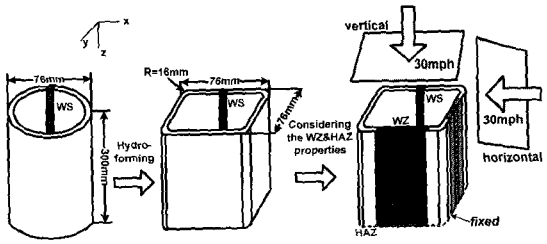

Fig. 7 Diagram of hydro-forming and crash simulation

인장 축에 맞추어 회전 배향하게 되어 발생하는 현상이다.

4. 충돌 평가

4.1 충돌 해석 종류 및 조건

Fig. 7에 도시되어 있듯이 용접선을 포함한 강관을 16mm의 코너를 갖는 사각관으로 하이드로포밍한 후, 용접부 및 열영향부의 물성을 고려하여 수직방향과 수평방향에 대한 충돌을 수치 해석하였다. 충돌 시 하이드로포밍에 의한 예변형(pre-strain)효과, 변형률 속도 민감도 및 용접열의 영향을 평가하기 위해, 위의 공정변수를 각각 고려하여 충돌 해석을 수행하였다.

4.2 하이드로포밍 및 충돌 해석

하이드로포밍의 유한 요소 해석은 ABAQUS/ Standard 를 이용하였고, 성형 조건으로는 내부 압

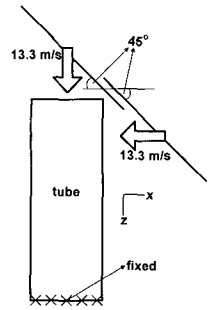

Fig. 8 Boundary conditions of crash simulations

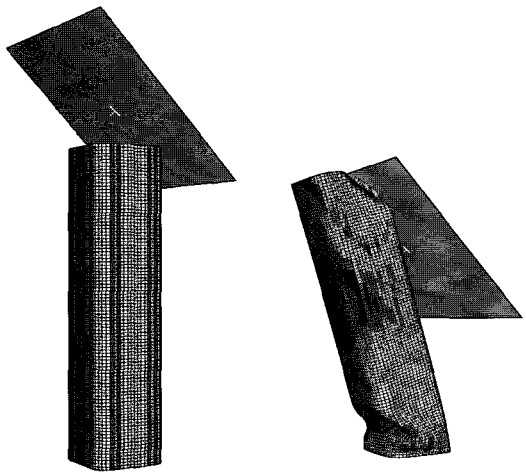

Fig.9(a) Schematic view of the finite element simulation for the crash test: Vertical case

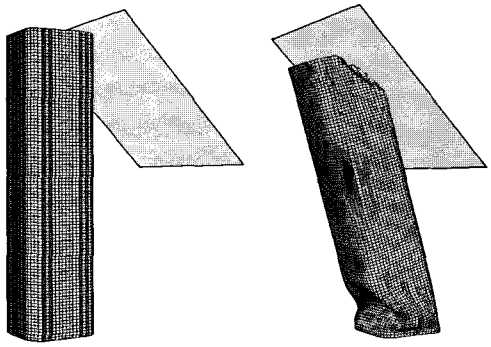

Fig. 9(b) Schematic view of the finite element simulation for the crash test: Horizontal case

력 100MPa와 다이와의 마찰 계수 0.1이 사용되었다. 한편 충돌해석은 외연적(explicit)인 방법으로 수행되므로 Import옵션을 사용하여 하이드로포밍의 결과를 충돌해석의 초기 조건으로 부과하게

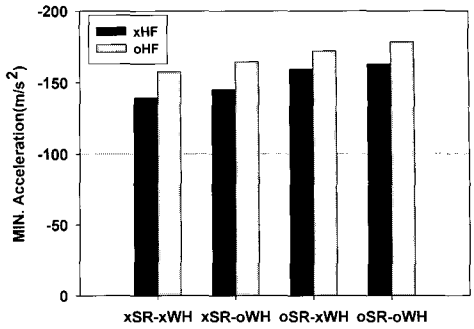

Fig.10(a) Minimum acceleration values for various crash simulation cases: Vertical case

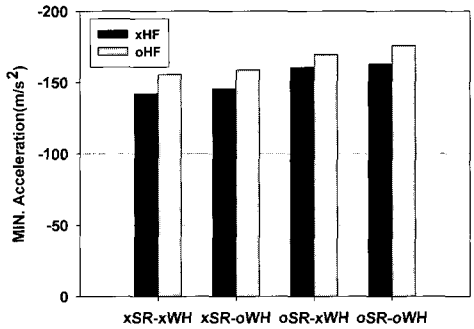

Fig.10(b) Minimum acceleration values for various crash simulation cases: Horizontal case

된다. 충돌의 유한 요소 해석은 ABAQUS/Explicit를 사용하였고, 충돌판의 질량은 250kg이다. Fig. 8에 나타나 있듯이, 수직방향 충돌의 경우 관이 배향된 z축에 대해 45°기울어져 13.3m/s(30mph)의 속력으로 8ms동안 +z축을 따라 관에 충돌하며, 수평방향 충돌의 경우도 45°기울어져 13.3m/s의 속력으로 8ms동안 -x축을 따라 충돌하게 된다.

Fig. 9에 수직 방향과 수평 방향의 충돌 해석에 사용된 격자 및 충돌 후 형상을 나타내었으며, Fig. 10에 충돌 해석시 각각의 경우의 최소 가속도를 정리하였다. 수직 방향 충돌과 수평 방향 충돌 모두 하이드로포밍을 고려하는 경우 관의 예변형양이 존재하므로 그렇지 않은 경우보다 최소 가속도가 더 작게 나타나며, 변형률 속도 민감도를 고려한 경우 역시 그렇지 않은 경우보다 더 작은 최소 가속도를 보여준다. 또한, 용접열 영향을 고려한 경우 그렇지 않은 경우보다 더 작은 최소 가속도를 나타내고 있으나, 그 차이가 앞선 두 경우보다 작았다. 비록 용접에 의한 열영향에 의해 재료의 강도가 커져 가속가 감소했지만, 용

접부의 면적이 강관 전체의 면적에 비해 작기 때문에 가속도의 감소량이 상대적으로 작았다.

다만, 충돌 해석시 성형 한계(forming limit)의 개념을 도입한다면, 상대적으로 낮은 성형성을 지닌 용접부나 열영향부에서 먼저 재료의 파단이 나타나 본 연구의 결과와 다른 경향을 보일 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구를 통해 자동차용 경량화 소재인 DP590 강 판재, 그리고 용접선을 포함한 관의 물성 측정이 이루어졌으며, 특히 판재의 MAG 용접부와 열영향부에 대해서는 연속압입법과 그것을 모사하는 유한요소해석을 통해 물성평가가 이루어졌다.

이를 바탕으로 하이드로포밍된 DP 강관의 충돌 특성에 대한 평가가 수치 해석을 통해 이루어졌다. 충돌 해석시, 하이드로포밍과 변형률 민감도를 고려하는 경우는 각각 예변형과 고속 변형에 따른 재료의 강도의 증가가 반영되므로, 최소 가속도가 감소한 결과가 계산되었다. 반면, 용접열영향에 따른 최소 가속도의 감소량은 상대적으로 적었다. 한편, 성형 한계 개념을 도입한 수치해석과 성형품의 실제 충돌 시험이 추가된다면 보다 정확한 충돌 특성 평가가 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 POSCO와의 공동연구과제로 수행되었으며, 고속인장시험에 도움을 주신 POSCO 기술연구소의 임지호 박사님께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R. E. Dic, S-H. Choi. F. Pourbograt, E. Chu, D. J. Lege, 2003, Plane Stress Yield Function for Aluminum Alloy Sheets – Part 1: Theory, Int. J. Plast., Vol. 19, pp. 1297~1319.

[2] K. Chung, O. Richmond, 1993, A Deformation Theory of Plasticity Based on Minimum Work Paths, Int. J. Plast., Vol. 9, pp. 907~920.

[3] J.-H. Ahn, D. Kwon, 2001, Derivation of Plastic Stress-Strain Relationship from Ball Indentations: Examination of Strain Definition and Pileup Effect, J. Mater. Res., Vol. 16, pp. 3170~3178.

[4] J. Alcalá, A. E. Giannakopoulos, S. Suresh, 1998, Continuous Measurements of Load-Penetration Curves with Spherical Micro-Indenters and the Estimation of Mechanical Properties, J. Mater. Res., Vol. 13, pp. 1390~1400.

[5] ABAQUS, 2005. User's Manual for Version 6.5, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc.

[6] T. Waterschoot, A. K. De, S. Vandeputte, B. C. De Cooman, 2003, Static Strain Aging Phenomena in Cold-Rolled Dual-Phase Steels, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 34A, pp.781~791.