

단조공정별 소성응력분포의 X.R.D 분석에 관한 연구

전승경¹, 김수연¹, 김준형¹, 이상걸[#]

Analysis of Forging Plastic Stress by X.R.D and F.E.M

S. K. Jeon, S. Y. Kim, J. H. Kim, S.G Lee

Abstract

Forging is applied for many industrial fields. Also, it is applied to hose nipple. Stress and metal analysis is finding method of forging possibility and we predict this possibility by finite element forging analysis. But there are also many manufacturing procedure after forging, and metal texture is varied by additional heat treatment or coating. So this research is focused on the measuring and analysis of plastic residual stress distribution at overall manufacturing procedure. From raw material to final product we measured real residual stress at each manufacturing procedure by X ray diffract meter, and simulated another procedure except forging by nonlinear finite element analysis. Also we showed how Zn-Ni coating is more contributable to metal strength than Zn coating. By this research we make final conclusion that process analysis must be observed from raw material to final manufacturing state for robust design.

Key Words : Forging(단조성형), plastic residual stress(소성잔류응력), X ray diffract meter(X 선회절측정기), Neutron Diffraction Method(중성자 회절법), Spacing Distance(면간거리), Defocusing Error(초점오차)

1. 서 론

자동차산업은 수 많은 부품의 제조 및 조립으로 만들어지며 이러한 자동차부품들은 주·단조, 압·사출 등의 수 많은 공법 및 공정으로 생산되고 있으며 이러한 공법 및 공정에는 반드시 변형 또는 열에 의한 잔류응력(Residual Stress) 누적현상이 발생한다.

자동차용호스의 금구(Nipple)를 예로 들어보자. 원봉모양의 탄소강소재가 원소재이며 이는 몇 단계의 인발·압출 및 열처리를 거친 後 길이에 맞추어 절단한 後 몇 단계의 단조성형 및 절삭가공 공정을 거쳐 단위부품이 된다. 이 과정을 잘 마치고 납품된 부품은 스웨이징(Swaging)이라는 후공정에 의하여 압착변형에 의하여 고무와 결합하며 이렇게 조립된 기능부품은 他 시스템부품과 나사 결합에 의하여 시스템부품이 된다. 이렇게 복잡한 연속공정으로 조립된 제품이 차량에 장착된 상태

에서 차량의 진동 및 작용력 등의 환경적 특성에 의하여 파괴현상이 발생한다면, 현실적으로는 문제에 대한 원인추정뿐 아니라 각 공정마다 제조회사가 다르기 때문에 이력관리 및 원인파악이 힘들어지는 특성이 있다.

따라서 본 연구에서는 자동차 호스용 금구의 파단문제에 대하여 소재 → 단조 → 가공 → 호스조립 → 도금 → 차량조립의 6 단계로 제조과정을 분류하고 원소재부터 시작하여, 소성응력 발생은 단조해석, 고무와 금속이 접촉하면서 변형하는 조립 공정 및 표면도금에 대하여는 비선형구조해석을 실시하여 최종적으로 시스템부품상태의 잔류응력분포를 계산하였으며, 객관적인 검증을 위해 실제 응력을 X.R.D(X ray diffract meter)로 계측하였다. 한편 전자주사현미경(S.E.M)을 이용하여 단조된 금속조직에 대한 영상분석을, 흐름성(Metal Flow)에 대하여는 샘플분석을 해 보았다. 이러한 일련의 분석을 통하여 문제해결능력을 확인해 보았다.

1. 화승R&A 기술연구소 (jeonsksk@hsrna.com)

교신저자: 한국기초과학지원연구원

E-mail: sagelee@kbsi.re.kr

2. 금속조직분석 (S.E.M)

2.1 사진분석(S.E.M)

Fig.1(a)와(b)은 실제 금구파단부의 주사현미경 사진이다. 파단면의 파괴양상을 살펴보면 취성 파단부와 연성 파단부가 공존하고 있는 형태임이 확인된다. 파단시 파단면의 단면감소율이 거의 없으나 딥플(Dimple)의 소성변형 양상이 보이며 이러한 형태의 균열이 광범위하게 전파된 것으로 보아 취성 파괴보다는 연성적인 파괴에 기인한 것을 알 수 있었다.

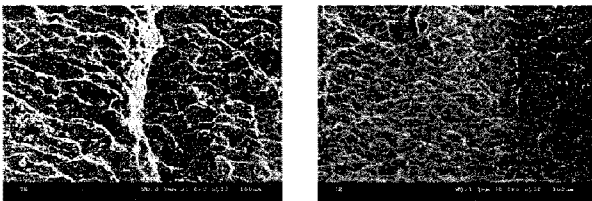
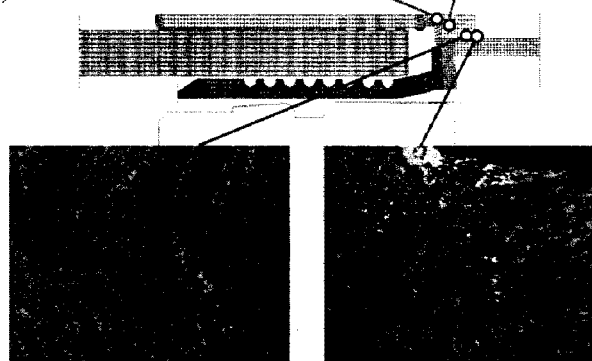


Fig. 1 (a) Coexistence of Ductile & Brittle Fracture
(b) Ductile Fracture



(c) 4 step forging 後 (d) 5 step forging 後

Fig.1 (c)와(d)는 각각 4 단 및 5 단 단조공정 後의 단류선(Metal Flow)의 양상을 보여주고 있다. 단조공정의 진행에 따라 점점 파단부의 응력집중현상을 고찰할 수 있었다.

2.2 Zn Zn-Ni 도금의 차이점 분석

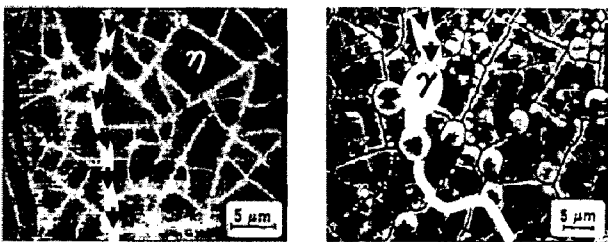


Fig. 2 (a) Zn (b) Zn-Ni Coating structure

Fig.2 와 같이 Zn-Ni 합금 도금을 하면 도금 표면층에 η (Zn)상과 γ (Ni₅Zn₂₁)상이 공존하게 되므로 결정립 미세화에 따라 강의 연성 향상 및 균열 파피가능성을 저하시킨다. 또한 γ (Ni₅Zn₂₁)

상은 균열의 전파방해기구로서 균열을 억제하는 균열 팁 효과의 기대가 가능하다.

Table.1 Property Comparison Zn and Zn-Ni coating

방녹도금의 특성비교	Zn 도금	Zn-Ni도금
경도 (Hv) ⁽¹⁾	60 ~ 80	150 ~ 170
도금표면경도(Hv) ⁽²⁾	평균150	평균260

⁽¹⁾문헌자료상 수치 ⁽²⁾실측 표면경도수치

Table.1 과 같이 Zn-Ni 합금을 탄소강에 도금하면 표면경도가 올라가는 현상을 보인다. 즉, 경도와 항복강도는 비례관계에 있으므로, 표면 경도가 올라감에 따라서 토크를 견디는 탄성구간 향상 기대효과가 가능하다. Steel 의 경우 경도와 항복강도와 관계의 대략적인 예측이 가능하다. 본 해석에서는 Table.2 를 이용하여 경도로 Young's Modulus 를 환산하여 유한요소해석을 수행하였다.

Table.2 Strength-Hardness Conversion (unit:psi)

Ultimate strength	Brinell hardness x 500
Yield strength	ultimate strength x 0.85
Shear strength	ultimate strength x 0.60

3. 잔류응력 측정시험 (X.R.D)

본 장에서는 X Ray Diffract Meter 를 이용하여 금속과 같은 결정성 재료의 응력을 측정하는 방법을 소개하고 단조 및 조립공정별 실응력을 측정·분석해 보았다.

3.1 X ray diffract meter Method

X.R.D(X-ray diffract meter)에 의한 잔류응력 분석은 Bragg's Equation 을 만족하는 결정성 시료의 결정면에 대하여 Tilt 에 대응하는 면간거리(Spacing Distance)의 변화 값으로 변형(Strain)을 측정하여 그 물질의 고유한 탄성항(Young's Modulus (E), Poisson Ratio(ν))을 이용한 Eq.1 의 응력-변형력 계산수식에 대입하여 응력 값을 산출하는 원리이다.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{----- Bragg's Equation}$$

$$\frac{d_{\psi, \phi} - d_0}{d_0} = -\frac{\nu}{E} \{ \sigma_{11} + \sigma_{22} \} + \frac{1+\nu}{2E} \{ \sigma_{11} \cos^2 \phi$$

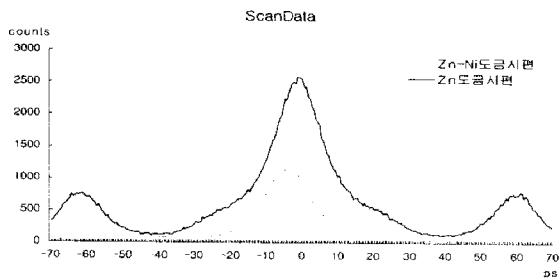
$$+ \sigma_{22} \sin^2 \phi + \sigma_{12} \sin(2\phi) - \sigma_{33} \} \sin^2 \psi$$

$$+ \frac{1+\nu}{2E} \{ \sigma_{13} \cos \phi + \sigma_{23} \sin \phi \} \sin(2\psi)$$

Eq. 1 Bragg's Equation and fundamental stress-strain relation

잔류응력은 X선 회절장치의 결과를 인용하였다. 사용한 X.R.D는 Philips M.R.D로 Long Fine Focus를 갖는 $Cu-\alpha$ Ray(40KV/30mA)을 사용하였으며, 시편의 형상을 고려하여 변위와 초점오차(Defocusing Error)의 최소화를 위하여 X-Ray Lens와 PPC(Parallel Plate Collimator)를 조합한 광학계로 구성하였고, X-선의 조사면적은 Cross Slit을 이용하여 1.0mm*1.0mm로 제한하여 측정하였다. X-선과 시편이 이루는 각(입사각)인 Omega Offset Method와 그와 수직한 방향인 Psi-Tilt 중에서 측정 결정면의 회절각(2θ)에 제한되지 않고, Tilt에 따른 초점오차(Defocusing Error)가 적은 Psi-Tilt를 Phi(360°) 및 Psi($\pm 90^\circ$)제어가 가능한 Eulerian Cradle을 이용하였다.

측정방법은 Psi-tilt Method를 이용하였으며, JCPD S-ICDD(International Centre for Diffraction Data)와 E.D.S를 통해 도금층인 Zn(2,0,1), Zn-Ni과 모재인 탄소강Steel(2,11)을 확인하였다. Psi Scan을 하기 위해 Omega(2θ) scan Rocking curve를 통해 시료의 배양성(preferred orientation)을 확인하고, 잔류응력 측정을 위한 적정각을 결정한다. 이때 Rocking curve의 Peak중에서 高角쪽에 위치한 Peak가 나타내는 각도를 선택하였다. 이는 Intensity는 감소하나 Rocking curve의 Peak가 높게 형성되어 잔류응력 측정이 용이하기 때문이다.

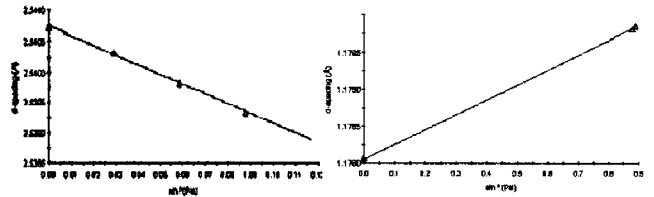


Graph.1 XRD Psi Rocking curve of Zn & Zn-Ni Coating sample

Graph.1은 결정각에서 Psi Scan을 한 결과를 도시하고 있다. Psi Rocking curve측정결과로 Zn도금시편이 선택적 배양성이 크게 나타남을 보여준다.

집합조직은 등간격 Scan법 적용이 난해하므로 4점 psi Scan 방법을 택하였다. Graph.2에 Psi-Tilt 별 결정면의 면간거리(spacing distance)의 변화를 도시하였다. 결정면의 1축 응력을 계산하였으며, 응력 상태에 따라 그 기울기와 절편 값을 가지며, 기울기가 (+)값이면 인장응력을 (-)값이면 압축응력을 의미한다. 4 점 Psi Scan방법으로 산출한 결과를 통해 잔류응력을 고찰한 결과 단조공정 후의 자동차 호스용 금구는 압축응력을 받고 있는 상태

임을 알 수 있었으며, 본체결 後 X.R.D 잔류응력 분석결과 Zn도금시편이 Zn-Ni도금시편 보다 잔류응력치가 높음을 알 수 있었다.



Graph.2 (a) Compression (b) Tension

4. 소성응력 해석 (F.E.M)

4.1 물성산출

범용 유한요소해석 프로그램인 MARC2005 를 이용하여 금속과 고무의 체결해석을 수행하였다. 고무를 등방성재료로 가정하면 물성치는 Eq.2 와 같이 변형률에너지밀도함수와 불변량(Invariant)과의 관계상수인 Mooney Rivlin Coefficient 로 표현하며 금구(SWCH10A)의 물성은 인장시험을 통하여 구하며 압축 Modulus 는 인장과 같다고 가정한다.

$$W = \sum_{k+l=1}^N a_{kl}(I_1 - 3)^k (I_2 - 3)^l + \frac{1}{2K}(I_3 - 1)^2$$

Eq.2 Mooney-Rivlin Coefficient

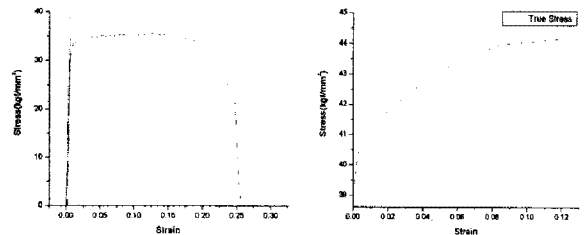


Fig.3 Tensile Strength Test of SWCH10A Metal

4.2 체결력 해석

금속과 고무는 1 차적으로 슬리브(Sleeve)와 금구(Nipple)의 가체결<Fig.4> 後 금구와 고무의 본체결<Fig.5>을 하게 된다. 본 연구에서는 도금층(10μm)을 고려하여 Zn 과 Zn-Ni 합금의 물성을 달리하여 그 차이를 비교· 분석하였다.



Fig. 4 (a) Zn Coating (b) Zn-Ni Coating 假締結 해석

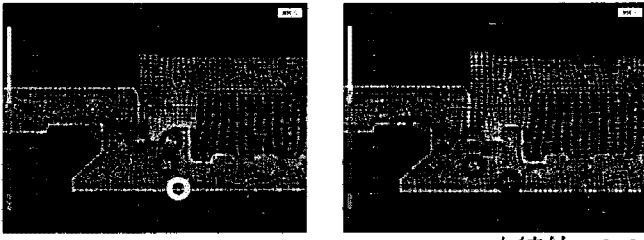


Fig.5 (c) Zn Coating (d) Zn-Ni Coating 本締結 해석

本 해석을 통하여 최대응력의 산출지점과 그 분포를 얻을 수 있었으며, 실제로 제품의 공정별 시험결과와 잘 일치(Correlation)하도록 몇 가지 수정작업을 통하여 X.R.D 로는 측정하기 힘든 부위의 응력분포까지 정확히 산출할 수 있게 하였다.

4.3 Flare Nut 조립해석

스웨이징된 Nipple 의 다른 면은 Flare Nut 로 파이프(Pipe)와 토그(Torque)에 의하여 체결된다. 조립토크를 가하면 Nipple 을 잡아당기는 축력이 발생하게 되는데, 이 축력은 노치(Notch)현상을 유발하여 응력집중부의 응력을 높이게 된다. 따라서 이 축력에 의한 영향을 체결력해석 時 추가로 고려하여 해석해야 한다.



$$T = \frac{1}{2} Q \cdot (d_2 \tan(\beta + \rho) + \mu_n \cdot d_n \cdot 2)$$

T : 조립토크(kgf · mm), Q : 축하중(kgf), d_2 : 나사 유효경, β : 나사 LEAD 각, ρ : 마찰각도, μ_n : F/NUT 와 Pipe 단말부와의 마찰계수, d_n : Pipe Form'g 부 유효경($\Phi 8$ TUBE : 9.5mm, $\Phi 10$ TUBE : 11.8mm)

Eq.3 Flare Nut 체결력 경험식

5. 결 론

소재부터 공정별로 잔류응력의 분포파악을 수행하여 다음의 결과를 얻을 수 있다.

1. 압출원소재는 인장응력이 존재하며, 단조공정 時는 구속조건에 따라 재료에 응력구배가 발생하므로 단조 前後 잔류응력에 대한 확인이 필요하다.
2. Zn 도금 대비 Zn-Ni 도금의 우수성 분석
 - 1) Ni 성분은 표면 경도를 높여주어 토크를 견디는 탄성구간의 향상 기대효과가 가능하다.

2) Zn-Ni 합금도금은 도금면에 η (Zn) 상과 γ (Ni₅Zn₂₁)상의 공존으로 균열 탭 효과가 있다.

3) Ni 는 금속조직의 Grain 의 조대화를 방지하고 Grain 미세화에 영향을 주어 강화기대가 가능하다.

4) 비록 數 μ m 의 얇은 도금층이지만 그 배향성으로 인하여 Swaging 잔류응력을 흡수한다.

3. 객관적인 검증을 위해 실제 응력을 X.R.D(X ray diffract meter)로 잔류응력을 분석한 결과 Zn 도금 사양이 Zn-Ni 도금사양 보다 잔류응력치가 높음을 알 수 있었다.

4. X.R.D 는 깊이방향의 측정은 불가능하며 3 축 응력시험은 많은 시간과 경비를 소요하지만, 소성 응력해석(F.E.M)을 병행하면 Nipple 내부의 응력분포 및 3 축 응력분포에 대한 예측이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] S. G. Jeon, J. H. Lee, J. H. Kim, H.S Kim, "A study on Improvements of Bending Stress and Circular Deformation Rate of Pipe Bending Procedure by Numerical Simulation", Korea Society of Automotive Engineers, 2004 Spring Conference Proceedings Vol. 3. 1316-1322
- [2] S.G. Jeon, J.H Kim, J.H Shin, S.G. Lee, "A Parametric Study on the Residual Stress of Pipe Bending after Bending Procedure", 13th rea Society of Automotive Engineers, 2005 Fall Conference Proceedings Vol. 3, pp. 651 ~ 156.
- [3] M.S.C Marc Introductory Course; Chapter.4 "Nonlinear Material Behavior"; Chapter5 "Contact Analysis" pp.55~110, Volume A, "Theory and User's Guide; Chapter.5 Nonlinear Analysis, pp.10~61.
- [4] "Plasticity", Chung-mun Gak, Prof. Dong-myung Kim, Department of Mechanical Engineering, Seoul National University
- [5] Oden, J.T and Carey G.F, 1984, "Finite Analysis of Solids and Structures", Mcgraw-Hill, London.
- [6] George. E. Dieter, University of Maryland, "Mechanical Metallurgy Third edition", Mcgraw Hill Publishing Company. pp. 22~28.
- [7] Alan N. Gent, 1992, "Engineering with Rubber", Oxford University Press, New York.