

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.7.659>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

5052-H32 알루미늄 합금의 통전 소성에 미치는 에너지밀도의 영향 검증

염경호* · 홍성태*† · 정용하* · 한경식** · 한흥남*** · 김문조***

* 울산대학교 기계공학부, ** 울산테크노파크 자동차부품기술연구소, *** 서울대학교 재료공학부

Evaluation of Effect of Electric Energy Density on the Electroplasticity of 5052-H32 Aluminum Alloys

Kyeong-Ho Yeom^{*}, Sung-Tae Hong^{*†}, Yong-Ha Jeong^{*}, Kyung-Sik Han^{**}, Heung Nam Han^{***} and Moon-Jo Kim^{***}

^{*} School of Mechanical Engineering, University of Ulsan,

^{**} Automotive parts Institute Center, Ulsan Techno Park,

^{***} Dept. of Materials Science & Engineering and Center for Iron & Steel Research, RIAM, Seoul Nat'l Univ.

(Received October 29, 2014 ; Revised February 4, 2015 ; Accepted March 16, 2015)

Key Words: Electroplasticity(통전소성), Energy Density(에너지밀도), Aluminum Alloys(알루미늄 합금)

초록: 본 연구에서는 다른 게이지 체적을 가지는 시편들의 동일한 에너지밀도 하에서의 통전소성 인장 거동을 실험을 통하여 비교하였다. 5052-H32 알루미늄 합금의 통전소성 인장실험의 결과는 시편의 게이지 길이나 폭 혹은 체적에 상관없이 동일한 에너지밀도가 가해질 때 거의 유사한 통전소성 특성을 보여 준다. 특히 통전소성 인장시험의 전형적인 현상인 stress-drop 의 크기를 비교할 때, 소재의 통전소성이 개별적인 전류밀도와 통전시간이 아닌 에너지밀도에 의해서 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다. 본 논문의 결과는 통전소성 현상을 응용한 제조공정의 개발 시 공정설계변수들 중 전류밀도와 통전시간 두 가지를 에너지밀도 하나로 줄일 수 있다는 것을 의미하며 이는 향후 다양한 통전소성 기반 제조기술의 개발에 이바지 할 것으로 예상된다.

Abstract: In the present study, electroplastic tensile behaviors of aluminum 5052-H32 alloy specimens with different gage dimensions are investigated under a constant electric energy density (electric energy per unit volume). The experimental results show that equivalent electric energy densities induce nearly identical electroplastic behaviors even with different gage dimensions (length, width, or volume). Additionally, the experimental results demonstrate that the electroplastic behavior of the selected aluminum alloy is best described by the electric energy density, which is a function of current density and current duration, rather than individual current density or current duration. The results of the present study suggest that the electric energy density may replace current density and current duration as a design parameter in electrically assisted forming processes.

1. 서 론

최근 자동차산업에서는 연비개선을 위하여 경량화의 필요성이 급격히 증가하고 있으며 이는 자연적으로 경량금속에 대한 수요증가로 이어지고 있다. 그러나 대부분의 경량소재, 특히 알루미늄 합

금과 마그네슘 합금 등은 철강 합금에 비하여 성형성이 낮다는 단점을 가지고 있다. 알루미늄(혹은 마그네슘) 합금의 성형성을 개선하기 위하여 고온에서 성형하는 방법들(열간 성형)이 일반적으로 고려되고 있으나, 고온에서의 금속의 성형은 경우 금형과 소재간의 윤활을 어렵게 하며, 금형과 소재 사이의 접촉 혹은 고온에서의 금형의 강도 저하로 인한 금형의 수명 감소 등과 같은 문제점들을 야기할 수 있다. 또한 5XXX 계열과 같은

† Corresponding Author, sthong@ulsan.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

일부 알루미늄 합금들의 경우에는 고온에서 성형 후 발생하는 풀립 처리 효과로 인하여 최종 제품의 강도가 낮아질 수 있다는 문제점을 가지고 있다. 열간 성형의 대안으로서 하이드로포밍 혹은 인크리멘탈포밍 등의 기술들이 고려될 수 있으나 이러한 기술들은 대부분 제조시설의 설치를 위한 초기 투자비용이 매우 높은 편이며 제조공정에 상대적으로 길어진다는 단점들이 있다. 그러므로 이러한 단점들을 보완하면서도 소재의 성형성 향상을 도모할 수 있는 새로운 기술의 필요성이 증가하고 있다.

통전소성(electroplasticity)은 소재가 소성변형을 겪는 중에 소재에 적절한 크기의 전류를 인가할 경우 과도한 온도의 상승 없이 급격하고 거의 즉각적인 기계적 특성의 변화가 발생하는 현상을 지칭한다. 1960 년대에 Troitskii⁽¹⁾가 나트륨과 같은 특정 물질에 전류를 가하면 물성치가 변화한다는 현상을 보고하였으며 최근 Conrad^(2,3)가 금속 재료의 다양한 통전소성 현상들을 보고하였다. 금속의 성형 중에 전류를 지속적으로 가하는(연속전류 조건) 실험들을 통하여 수행된 통전소성 연구결과들에 의하면 압축하중 하에서는 전류밀도(시편의 단위단면적당 전류량)가 높아질 수록 금속의 유동응력이 지속적으로 감소하며 성형성 또한 지속적으로 향상됨이 관찰되었으나 인장하중 하에서는 전류밀도가 높아질수록 유동응력은 지속적으로 감소하지만 연신율은 지속적으로 저하되는 현상이 관찰되었다.^(4,5) 이로 인하여 연속전류 하에서의 통전소성을 이용한 가공기술의 개발(electrically assisted manufacturing)은 판재성형에 적용하기에는 적합하지 않다고 여겨졌다. Roth 등⁽⁶⁾은 인장하중 하에서의 연속전류 통전 시 발생하는 소재의 연신율의 감소현상을 극복하기 위해 주기적 형태의 통전(a pulsed electric current)을 실시하였으며 적절한 크기의 전류밀도를 주기적으로 인가할 경우 5754 알루미늄 합금의 연신율을 최대 400 %까지 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 또한 Salandro 와 동료 연구자들^(7,8)은 통전시간(duration of electric current)과 전류 밀도의 변화에 따른 다양한 5XXX 계열 알루미늄 합금들의 통전소성 특성의 변화를 조사하였으며 통전조건 최적화에 관한 의견을 제시하였다. 통전소성의 메커니즘에 관하여서는 불행히도 아직 만족스러운 설명이 이루어지지 않고 있으나 최근 Kim 등⁽⁹⁾은 주기적 통전 조건 하에서의 인장변형을 겪은 5052-H32 알루미늄 합금 시편 미세구조 분석을 통하여 통전소성과 저항발

열이 별개의 현상임을 증명하였고, 이어서 Roh 등⁽¹⁰⁾은 5052-H32 알루미늄 합금의 주기적 통전 조건하에서의 인장곡선의 전반적인 형태(global stress-strain curve)를 묘사할 수 있는 실험식을 제안하였다.

최근의 통전소성 연구들에서는^(10,11) 금속재료의 통전소성 거동이 전류밀도의 크기와 통전시간의 길이에 개별적으로 영향을 받기 보다는 단위체적당 전기적 에너지량(electric current density) 혹은 에너지밀도에 의해서 지배된다는 결과들이 보고되었다. 그러나 이러한 결과들은 일정한 체적을 가진 시편에 각기 다른 전류밀도와 통전시간의 조합을 통한 동일한 에너지밀도 조건을 발생시켜 관찰된 결과이며 시편의 체적 자체가 통전소성 거동에 미치는 영향, 즉 체적이 달라도 에너지밀도가 같으면 통전소성 거동이 같은지의 여부에 관한 검증은 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 체적이 다른 인장시편들에 적절한 전류밀도와 통전시간의 조합을 통하여 동일한 에너지밀도 조건을 발생시킨 후 주기적 통전 시의 통전소성 거동들을 비교하여 에너지밀도가 동일할 경우 금속재료의 통전소성 거동의 동일하다는 주장을 검증하고자 한다.

2. 실험방법

준정적(quasi-static) 인장변형 중의 시편에 전류를 인가하기 위하여 Fig. 1 의 개념도에서 보이는 바와 같이 전류량과 통전시간을 제어할 수 있는 기능을 갖춘 저항용접기(Vadal-10000U, 효성)를 적용한 통전소성 인장실험 시스템을 구축하였다. 인장실험 중의 시편의 온도변화와 연신율의 변화를 측정하기 위하여 적외선 열화상 카메라(T-440, Flir)와 레이저 신율계(LX500, MTS)를 사용하였다. 열화상 카메라를 이용한 온도 측정을 위하여 흑색 도료를 시편의 한쪽 면에 도포하여 방사율을 보정

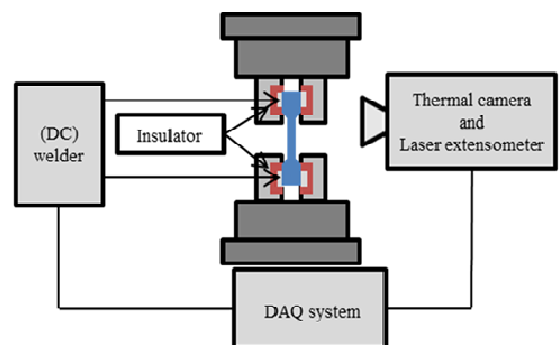


Fig. 1 A schematic of experimental set-up

하였으며 반대쪽 면에는 레이저 신울계를 이용한 연신을 측정을 위하여 반사테이프를 부착하였다. 또한 통전 중 실험장비의 보호를 위하여 시편과 장비의 그립 부의 사이에 베이클라이트(bakelite)를 삽입하여 절연함으로써 전류가 시편으로만 통할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 2 mm 두께의 5052-H32 알루미늄 합금 판재를 사용하여 판재의 압연방향과 시편의 길이방향이 일치하도록 인장시편을 제작하였다. 실험에 사용된 알루미늄 합금의 화학적 조성은 Table 1 과 같다. 통전소성에서 에너지밀도 효과의 검증을 위하여 Table 2 와 같이 각기 다른 게이지 폭 이나 게이지 길이를 가지는 네 종류의 시편들을 제작하였다.

Table 2 에서 보이는 바와 같이 시편 그룹 I 과 II 는 시편의 게이지의 길이는 동일하나 폭이 다르며 그룹 III 과 IV 는 시편의 게이지의 폭은 동일하나 길이가 다르게 설계되었다. 또한 그룹 I 과 III 그리고 그룹 II 과 IV 는 다른 길이와 폭의 조합으로 각각 동일한 게이지 체적을 가지도록 설계되었다.

모든 인장실험은 고정된 변위속도 2.5 mm/min 으로 수행되었다. 통전소성 인장실험에서 통전 시 시편에 가해지는 전기에너지의 단위체적당 크기 즉 에너지밀도 j_o 는 아래와 같이 간단히 계산될 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$j_o = \frac{J}{V} = \frac{I^2 R t_d}{V} \quad (1)$$

Table 1 The chemical composition of aluminum 5052-H32 alloy

Alloying element, wt %	Cr	Cu	Fe	Mg
5052-H32	0.15-0.35	≤0.10	≤0.40	2.20-2.80
Alloying element, wt %	Mn	Si	Zn	
5052-H32	≤0.10	≤0.25	≤0.1	

Table 2 The geometry of specimens

Specimen	Width (mm)	Gage length (mm)	Area (mm ²)	Volume (mm ³)
I	10	50	20	1000
II	15	50	30	1500
III	12.5	40	25	1000
IV	12.5	60	25	1500

위의 식에서 j_o 는 단위부피당 에너지 밀도, J 는 전기에너지, V 는 시편의 체적, I 는 전류량, R 은 전기저항값, t_d 는 전류가 흐르는 시간(통전 시간)을 의미한다. 식 (1)은 전기저항값 R 이 소재의 비저항 ρ 와 시편의 게이지 길이(L)와 단면적(A)의 함수 즉 $R = \rho L/A$ 임을 이용하면 시편의 게이지의 단위 단면적에 대한 전류값과 소재의 물성치인 비저항 그리고 통전시간의 함수로 아래와 같이 간단히 다시 쓰여질 수 있다.

$$j_o = \left(\frac{I}{A}\right)^2 \rho t_d \quad (2)$$

본 연구에서는 Fig. 2 에서 보이는 바와 같이 모든 통전소성 인장실험에서 통전시간을 0.5 초로 그리고 통전시의 소성 변형량을 시편의 게이지의 공칭 변형율 0.02 로 고정하였다. 식 (2)에서 보이듯이 통전시간이 고정될 경우 에너지밀도는 전류밀도에 의해서만 결정된다. 따라서 Table 3 에서와 같이 시편에 동일한 전류밀도를 유도함으로써 동일한 에너지밀도를 시편에 인가하여 실험을 진행하였다. 실험결과의 반복성을 확인하기 위하여 동일한 실

Table 3 Experimental parameters

Specimen	Area (mm ²)	Current (A)	Current density (A/mm ²)	Duration (s)
I	20	1200	60	0.5
		1500	75	
II	30	1800	60	
		2250	75	
III	25	1500	60	
		1875	75	
IV	25	1500	60	
		1875	75	

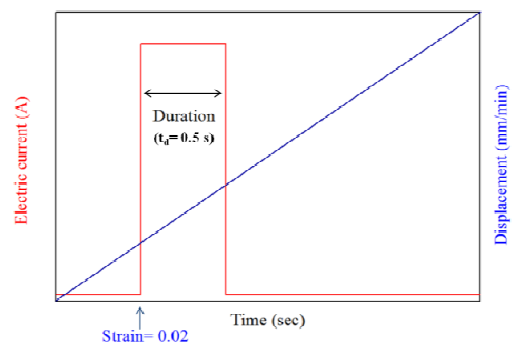


Fig. 2 A schematic of displacement and electric current as a function of time

험조건에 대하여 최소 네 번의 실험을 실시하였다.

3. 결과 및 분석

그룹 I의 시편들에 전류밀도 75 A/mm^2 을 가하였을 때의 실험결과들의 예에서 보이듯이(Fig. 3), 본 연구의 실험결과들의 반복성은 매우 우수하다고 할 수 있다. Figure 3의 결과에서 보이듯이, 소성변형 중 전류가 가해지면 5052-H32 알루미늄 합금의 유동응력은 거의 즉각적으로 현격하게 감소하며 전류가 제거되면 빠르게 다시 증가하고 이어서 일반적인 가공경화 형태의 응력-변형을 선도를 보여준다. Roh 등⁽¹⁰⁾은 소성 영역에서 통전 시 발생하는 이러한 유동응력의 거의 즉각적인 감소를 stress-drop 이라고 정의하였다. 이는 통전 후의 가공경화 특성과 함께 소재의 통전소성 특성을 나타내는 중요한 특성치로 이용될 수 있다.⁽¹¹⁾ Figure 4는 그룹 I 시편에 가해진 두 종류의 에너지밀도에 대하여 시편의 온도변화를 시간의 함수로 보여주고 있으며, 이에서 볼 수 있듯이 시편의 온도 상승량은 통전 시의 stress-drop의 크기를 고려할 때 크기 않은 편이다. Kim 등⁽⁹⁾의 연구에서 이미 확인된 바와 같이 적절한 에너지밀도의 범위 내에서는 통전에 의한 온도상승은 통전소성 현상의 일부를 설명할 수는 있으나 주요 원인이 되지는 않는다.

본 연구에서 선택된 두 가지의 전류밀도를 60 그리고 75 A/mm^2 에 대해서 시편의 게이지 체적에 관계없이 동일한 에너지밀도가 가해질 때 거의 동일한 통전소성 거동이 발생하므로 Fig. 5는 전류밀도 60 A/mm^2 에 대하여 그룹 I, II, III, IV 시편의 시험결과가 거의 동일함을 확인시켜 준다. 인장 중 1회의 통전을 가하는 통전소성 인장실험에서

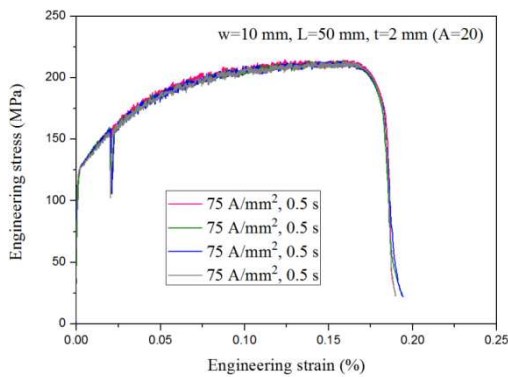


Fig. 3 Stress-strain curves of specimen type I under a single pulse of electric current for the current density of 75 A/mm^2

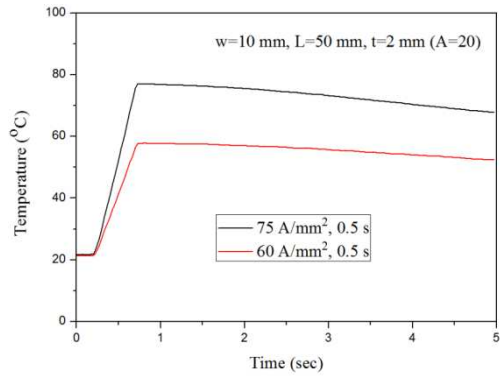


Fig. 4 Temperature histories as a function of time

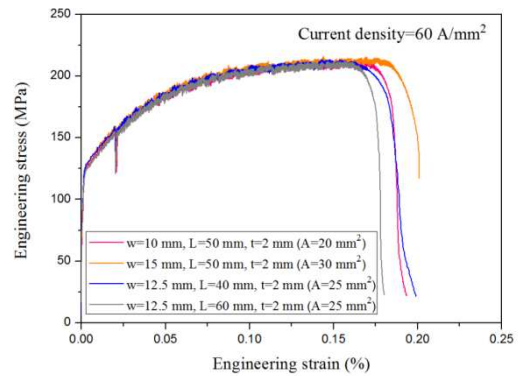


Fig. 5 Stress-strain curves under a single pulse of electric current for specimens with different gage geometries (types I, II, III, and IV)

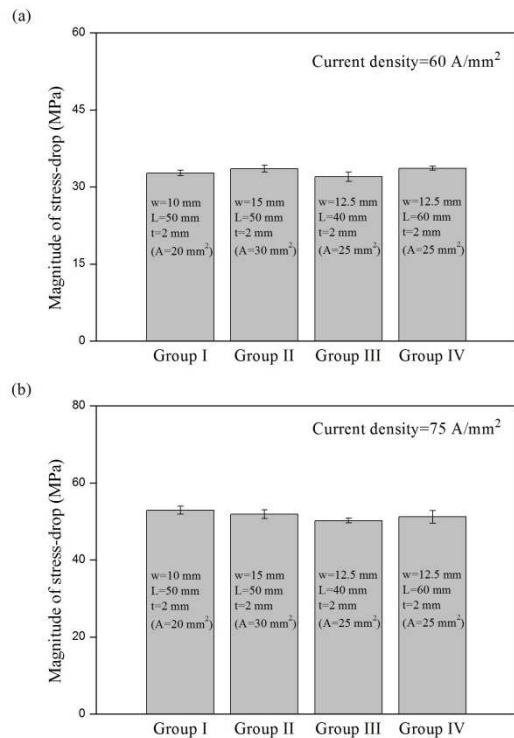


Fig. 6 The magnitude of stress-drop with current density of (a) 60 A/mm^2 (b) 70 A/mm^2

소재의 통전소성 특성을 나타내는 중요한 특성치인 stress-drop 의 크기를 시편의 그룹 별로 비교해 볼 때(Figs. 6(a)와 (b)), 이미 Kim 등⁽⁹⁾이나 Roh 등⁽¹⁰⁾의 연구에서 보여진 바와 같이 더 큰 전류밀도 즉 더 큰 에너지밀도가 더 큰 stress-drop 을 발생 시킴을 보여준다. 또한 실험결과는 시편에 가해진 에너지밀도 두 가지 모두에 대하여 시편 그룹들 간의 stress-drop 의 크기가 거의 일치함을 보여준다. 이러한 실험결과는 에너지밀도가 통전소성 거동을 결정하는 주요 인자임을 확인시켜 주며 무엇보다도 시편의 체적에 관계없이 동일한 에너지밀도 하에서는 동일한 통전소성 거동이 발생한다는 것을 확인하여 준다.

4. 결 론

본 연구에서는 통전소성에 영향을 미치는 에너지밀도의 영향을 검증하기 위하여 다른 게이지 체적을 가지는 시편들의 동일한 에너지밀도 하에서의 통전소성 거동을 실험을 통하여 비교하였다. 통전소성 인장실험의 결과는 시편의 게이지 길이나 폭 혹은 체적에 상관없이 동일한 에너지밀도가 가해질 때 주어진 알루미늄 합금은 거의 유사한 통전소성 특성을 나타냄을 보여준다. 이는 각기 다른 전류밀도와 통전시간의 조합으로 얻어진 동일한 에너지밀도들에서 동일한 통전소성 거동이 발생한다는 기존의 Roh 등의 연구결과에 합하여져서 금속소재의 통전소성 거동이 전류밀도와 통전시간에 개별적으로 영향을 받는 것이 아니라 소재에 가해진 에너지밀도에 의해서 영향을 받는다는 것을 확인시켜 준다. 본 논문의 결과는 통전소성 현상을 응용한 제조공정의 개발 시 공정설계변수들 중 전류밀도와 통전시간 두 가지를 에너지밀도 하나로 줄일 수 있다는 것을 의미하며 이는 향후 다양한 통전소성 기반 제조기술의 개발에 이바지 할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 울산지방과학연구단지 R&D 과제지원사업에 의해서 수행되었다.

참고문헌 (References)

(1) Troitskii, O.A., 1969, "Electromechanical Effect in

- Metals." *Pis'ma Zhurn. Experm. Teoret. Fiz.* Vol. 10, No. 1, pp. 18~22.
- (2) Conrad, H., 2000, "Effects of Electric Current on Solid State Phase Transformations in Metals." *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 287, No. 2, pp. 227~237.
- (3) Conrad, H., 2000, "Electroplasticity in Metals and Ceramics," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 287, No. 2, pp. 276~287.
- (4) Ross, C.D., Irvin, D.B. and Roth, J.T., 2007. "Manufacturing Aspects Relating to the Effects of Direct Current on the Tensile Properties of Metals," *J. Manuf. Sci. E.-T. ASME* 129, 342~347.
- (5) Perkins, T.A., Kronenberger, T.J. and Roth, J.T., 2007. "Metallic Forging Using Electrical Flow as an Alternative to Warm/Hot Working." *J. Manuf. Sci. E.-T. ASME* 129, 84~94.
- (6) Roth, J.T., Loker, I., Mauck, D., Warner, M., Golovashchenko, S.F. and Krause, A., 2008. "Enhanced Formability of 5754 Aluminum Sheet Metal Using Electric Pulsing," *Trans. NAMRI/SME* 36, 405~412.
- (7) Salandro, W.A., Ashraf, K. and Roth, J.T., 2009. "Tensile Formability Enhancement of Magnesium AZ31B-0 Alloy Using Electrical Pulsing." *Trans. NAMRI/SME* 37, 387~394.
- (8) Salandro, W.A., Jones, J.J., McNeal, T.A., Roth, J.T., Hong, S.-T. and Smith, M.T., 2010. "Formability of Al 5xxx Sheet Metals Using Pulsed Current for Various Heat Treatments." *J. Manuf. Sci. E.-T. ASME* 132, 051016-1-11.
- (9) Kim, M.-J., Han, H.N., Lee, K.H., Oh, K.H., Lee, W.-B., Choi, I.-S. and Hong, S.-T., 2014, "An Observation of Electric Current Induced Annealing During Uniaxial Tension of Aluminum Alloy," *Scripta Materialia*, Vol. 75, 58~61
- (10) Roh, J.-H., Seo, J.-J., Hong, S.-T., Kim, M.-J., Han, H. N. and Roth, J. T., 2014, "The Mechanical Behavior of 5052-H32 Aluminum Alloys Under a Pulsed Electric Current" *International Journal of Plasticity*, Vol. 58, 84~99
- (11) Kim, M.-S., Vinh, N. T., Yu, H.-H., Hong, S.-T., Lee, H.-W., Kim, M.-J., Han, H. N. and Roth, J. T., 2013, "Effect of Electric Current Density on the Mechanical Property of Advanced High Strength Steels Under Quasi-Static Tensile Loads." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 15, 1207~1213.