

열화된 스테인리스강의 비커스 경도에 대한 와이블 확률 통계 특성에 관한 연구

A study on Weibull Probability Statistics Characteristics for Vickers Hardness of Degraded Stainless Steel

남기우* · 조승덕** · 김선진*** · 안석환****†

Ki-Woo Nam*, Sung-Duck Cho**, Seon-Jin Kim*** and Seok-Hwan Ahn****†

(Received 13 June 2017, Revision received 07 September 2017, Accepted 08 September 2017)

Abstract: Vickers hardness is an important material in the design and reliability is required. Therefore, these values are very important as the basic data for design, manufacture and development, and the identification of quantitative probability distribution characteristics such as mean and dispersion is a very important parameter in design. In this study, Vickers hardness was measured after artificially heat-treated in the temperature range 753K, where chrome depletion near the grain boundary occurred for three kinds of stainless steels, and the Vickers hardness were evaluated. From the results, Vickers hardness increased with increasing heat treatment temperature. In Weibull distribution for Vickers hardness, the dispersion of STS310S at 813K and 873K was small, and the dispersion of STS316L at 753K, 933K and 993K was small. Also, STS347H exhibited the lowest dispersion at 753K in three kinds of stainless steels. The scale parameter increased with increasing heat treatment temperature in three kinds of stainless steels.

Key Words : Stainless Steel, Weibull Probability Statistics, Vickers Hardness, Heat Treatment Temperature, Scale Parameter, Shape Parameter

1. 서 론

자동차, 조선, 항공, 원자력플랜트, 화력발전, 석유화학 등 다양한 분야에서 경년열화에 견디기

위하여 내식성과 내열성 등의 특성이 우수한 스테인리스강이 광범위하게 활용되고 있다^{1,2)}. 스테인리스강은 강도, 가공성 등과 같은 기계적 특성을 확보하기 위하여 퀴칭, 템퍼링 등과 같은 열처

****† 안석환(교신저자) : 중원대학교 메카트로닉스학과

E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942

*남기우 : 부경대학교 재료공학과

**조승덕 : 부경대학교 학연협동기계공학

***김선진 : 부경대학교 기계설계공학과

****† Seok-Hwan Ahn(corresponding author) : Department of Mechatronics, Jungwon University.

E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942

*Ki-Woo Nam : Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University.

**Sung-Duck Cho : Graduate School, UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

***Seon-Jin Kim : Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.

리를 실시한다^{1,3)}.

스테인리스강의 열처리는 주요한 구성원소인 Cr과 C의 반응이 열처리 후의 특성에 큰 영향을 미친다. 그러나 오스테나이트계 스테인리스강은 698K~1088K의 온도에서는 열처리에 의하여 크롬 탄화물(Cr₂₃C₆)이 석출되면 입계 근처의 크롬고갈 영역이 발생하여 외력에 대한 저항성이 감소하는 에민화현상이 발생하며, 이로 인하여 입계부식 발생 가능성과 함께 입계응력부식에 의한 균열 가능성이 높아진다고 보고되고 있다⁴⁻¹⁰⁾.

재료의 기계적 특성은 설계, 제조 및 개발의 기초 데이터로서 아주 중요하게 사용되며, 이들 기계적 특성치의 평균값이나 분산 등의 정량적인 확률분포 특성의 파악은 설계에서 매우 중요한 변수이다¹¹⁻¹³⁾. 비커스 경도는 설계에서 중요한 자료이며 신뢰성이 요구된다. 신뢰성은 확률로 정의되므로 수학적인 표현방법이 사용된다.

본 연구에서는 3종류의 스테인리스강에 대하여

입계 근처의 크롬고갈이 발생하는 753K의 온도 범위에서 인위적으로 열처리한 후 비커스 경도를 측정하고, 이에 대한 와이블분포의 통계적 특성을 이용하여 비커스 경도의 확률론적 특성을 평가하였다¹⁴⁾.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

본 연구에서 사용한 재료는 두께 6mm의 STS310S, STS316L 및 STS347H의 3종류의 스테인리스강이다. 재료의 화학성분 및 기계적 성질은 각각 Table 1과 2에 나타낸다. 재료에는 추가적인 용체화열처리를 수행하지 않았고, 753K, 813K, 873K, 933K 및 993K의 5가지 적용온도범위를 선정하였다. 적용된 온도에서 4시간 열처리 후 노냉시켰다.

2.2 실험방법

열화된 3종류의 스테인리스강 시험편에 비커스 경도시험을 수행하였다. 비커스 경도는 경면 연마한 시험편에 대해 비커스경도기(Mitutoyo, HV-112)를 사용하여 19.6N의 하중으로 각 20회씩 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 비커스 경도

Fig. 1은 3종류의 스테인리스강의 열처리 온도에 따른 비커스 경도를 나타낸다. 비커스 경도는 20회 측정된 것의 평균값으로 나타내었다. 비커스 경도는 열처리 온도의 증가에 따라서 증가하는 경향을 나타내었다. 일반적으로 열처리 온도가 증가할수록 탄화물이 계면에 석출하기 때문에 경도가 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 2는 비커스 경도와 인장강도와의 관계를 나타낸 것이다. 인장강도는 본 연구에 사용된 3종류의 스테인리스강을 사용하여 KS 1호 시험편에 따라 인장시험편을 제작하고, 만능인장시험기(Oriental OTV-10C)를 사용하여 크로스헤드 속도

Table 1 Chemical compositions of three kinds of stainless steels(wt. %)

	STS310S	STS316L	STS347H
C	0.05	0.021	0.041
Si	0.58	0.38	0.47
Mn	0.87	0.83	1.88
P	0.017	0.021	0.034
S	0.001	0.001	0.0003
Cr	25.4	16.78	17.12
Ni	19.2	10.02	9.29
Mo	-	2.04	-
N	-	0.05	-
Nb	-	-	0.47

Table 2 Mechanical properties of three kinds of stainless steels

	STS310S	STS316L	STS347H
Ultimate strength σ_u (MPa)	584	607	625
Yield strength $\sigma_{0.2}$ (MPa)	304	314	293
Elongation ϵ (%)	49.5	55.0	56.0

2mm/min으로 하여 얻어진 응력-변형률 선도로부터 구한 공칭응력을 사용하였다. 이 그림에서 비커스 경도의 증가에 따라서 인장강도는 재료에 따라서 다르게 나타나는 경향을 보였다. STS310S의 인장강도는 비커스 경도와 비례하여 증가하다가 감소하였다. 이것은 873K 이후에서 Cr탄화물이 형성되어 비커스 경도는 증가하지만 재료가 취화하여 인장강도가 저하한 것이라 판단된다. STS316L은 Cr탄화물의 형성이 비교적 적기 때문에 비커스 경도의 약간의 증가에도 불구하고 인장강도는 거의 비슷하게 나타났다. 그러나 STS347H는 인장강도에 비례하여 비커스 경도도 증가하였다. 이것은 Nb의 첨가에 의하여 결정립이 미세화하였기 때문이라고 사료된다.

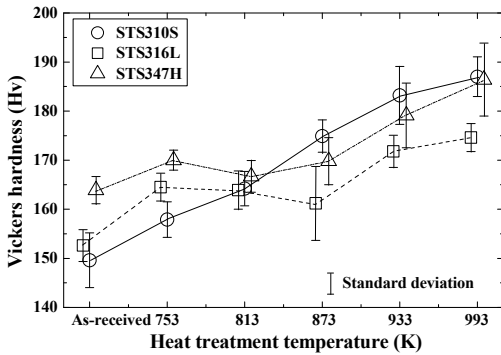


Fig. 1 The variation of Vickers hardness according to heat treatment temperature

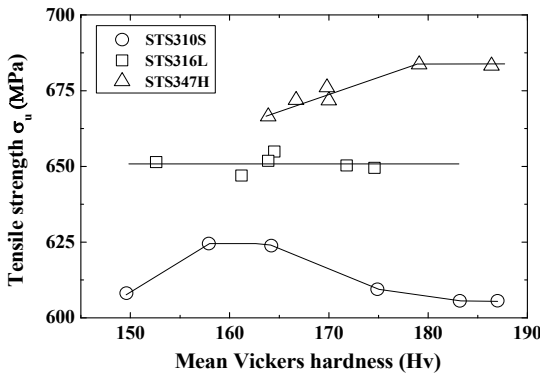


Fig. 2 Relationship between nominal tensile strength and mean Vickers hardness

3.2 비커스 경도의 2-파라미터 와이블 확률 통계 분석

일반적으로 3-파라미터 와이블분포는 다음과 같은 확률분포함수를 가진다.¹⁵⁻¹⁷⁾

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - \gamma}{\beta - \gamma} \right)^\alpha \right] \quad (1)$$

여기서, α 는 비커스 경도의 변동성을 의미하는 형상 파라미터(Shape parameter)이며, β 는 63.2% 확률에서의 특성치를 나타내는 척도 파라미터(Scale parameter)이다. 그리고 γ 는 최소강도를 의미하는 위치 파라미터(Location parameter)이다. 본 연구에서는 데이터의 수 등을 고려하고 해석의 편의성을 고려하여 $\gamma=0$ 인 다음과 같은 2-파라미터 와이블분포에 대하여 고찰하였다.

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (2)$$

이때의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left[\left(\frac{x}{\beta} \right)^{\alpha-1} \right] \exp \left[- \left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (3)$$

또한 이 분포의 신뢰도 함수 $R(x)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$R(x) = \exp \left[- \left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (4)$$

한다. 2-파라미터 와이블함수의 평균(μ)는 다음 식으로 주어진다.

$$\mu = \beta \cdot \Gamma \left(\frac{1}{\alpha} + 1 \right) \quad (5)$$

여기서 $\Gamma \left(\frac{1}{\alpha} + 1 \right)$ 는 감마함수(Gamma function)이다.

이상과 같은 와이블분포의 통계적 특성을 이용하여 3종류 스테인리스강의 비커스 경도의 확률론적 특성을 평가하였다.

Fig. 3~5는 각각 STS310S, STS316L 및 STS347H의 비커스 경도 데이터를 와이블 확률지에 나타낸 것이다. 3종류의 스테인리스강의 비커스 경도는 확률지상에서 직선으로 표현되고 있으므로 와이블 확률분포에 잘 따르고 있다고 볼 수 있다.

또한 비커스 경도에 대한 해석결과를 Table 3~5에 나타낸다. 표에는 산술통계에 의한 평균(Mean), 편차(Standard deviation: STD) 및 변동계수(Coefficient of variation: COV)도 함께 나타내었다.

Fig. 3은 STS310S의 결과를 나타낸다. 열처리 시험편의 형상 파라미터는 모재에 비하여 8~112% 크게 나타나 경도의 분산이 작음을 알 수 있다. 척도 파라미터는 5~24% 증가하여 파괴확률 63.2%에서의 경도가 증가하였다. 특히 753K 및 873K 시험편의 형상 파라미터는 각각 9% 및 16% 증가하여 경도가 증가하였다. 그에 비하여 Cr이 가장 많이 검출된 933K 시험편의 척도 파라미터는 22% 증가하였으나 형상 파라미터는 가장 적은 8% 크게 나타났다. 이것은 예민화에 의하여 63.2%에서 특성수명은 증가하였으나 다른 열처리 시험편에 비하여 경도의 분산이 많음을 의미한다. 이와 같이 STS310S는 예민화 온도영역에서 특성수명은 증가하였으나 경도의 분산이 많으므로 구조물에 적용할 때 주의해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 4는 STS316L의 결과를 나타낸다. 열처리 시험편의 형상 파라미터는 모재에 비하여 -55~29%로 나타나 열처리 온도에 따라서 분산의 정도가 다르게 나타났다. 척도 파라미터는 7~14% 증가하여 파괴확률 63.2%에서의 경도가 증가하였다. 특히 753K 및 873K 시험편의 형상 파라미터는 각각 -12% 및 -55% 작게 나타나 경도의 분산이 많이 나타났으며 척도 파라미터는 약 7% 증가하여 경도가 증가하였다. 그에 비하여 753K, 933K 및 993K 시험편의 형상 파라미터는 각각 26%, 6% 및 29% 크게 나타나 분산이 적었으며 척도 파라미터도 각각 7%, 12% 및 17% 증가하여 63.2%에서 특성수명은 증가하였다. 이와 같이 STS316L은

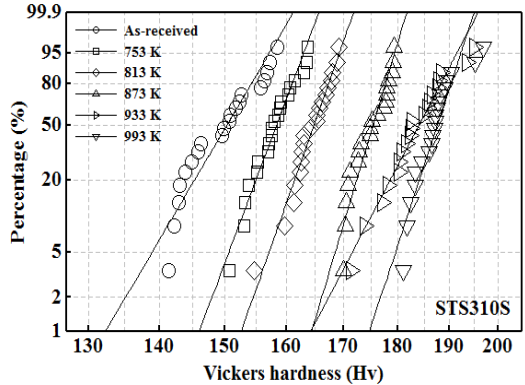


Fig. 3 Weibull plots for Vickers hardness of STS310S specimen

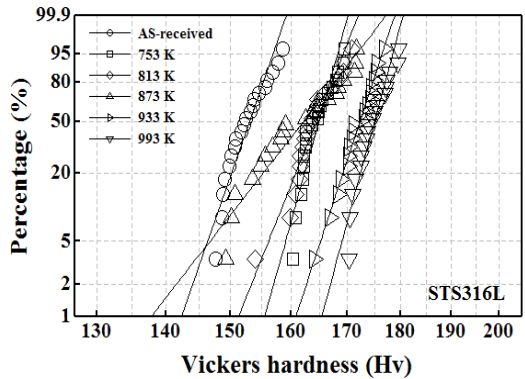


Fig. 4 Weibull plots for Vickers hardness of STS316L specimen

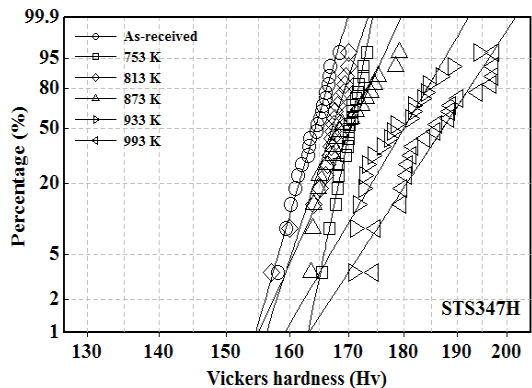


Fig. 5 Weibull plots for Vickers hardness of STS347H specimen

Table 3 The estimated Weibull parameter for STS310S specimen

Parameter \ Specimens	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
As-received	30.6	152.3	149.6	5.57	0.037
753K	49.6	159.6	157.9	3.62	0.023
813K	60.6	165.8	164.2	3.50	0.021
873K	65.30	176.4	174.9	3.29	0.019
933K	33.1	186.0	183.2	5.90	0.032
993K	42.2	189.1	187.0	4.04	0.022

Note: (a) shape parameter, (b) scale parameter, (c) mean, (d) standard deviation(STD), (e) coefficient of variation (COV)

Table 4 The estimated Weibull parameter for STS316L specimen

Parameter \ Specimens	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
As-received	58.0	154.2	152.6	3.24	0.021
753K	72.9	165.7	164.5	2.85	0.017
813K	50.9	165.6	163.9	3.90	0.024
873K	25.9	164.5	161.2	7.52	0.047
933K	61.6	173.3	171.8	3.27	0.019
993K	74.6	175.8	174.6	2.86	0.016

Note: (a) shape parameter, (b) scale parameter, (c) mean, (d) standard deviation(STD), (e) coefficient of variation (COV)

Table 5 The estimated Weibull parameter for STS347H specimen

Parameter \ Specimens	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
As-received	69.3	165.2	163.9	2.78	0.017
753K	98.4	170.9	170.0	2.04	0.012
813K	62.9	168.0	166.7	3.23	0.019
873K	44.8	171.8	169.8	4.78	0.028
933K	34.7	181.8	179.1	6.58	0.037
993K	30.8	189.5	186.4	7.44	0.040

Note: (a) shape parameter, (b) scale parameter, (c) mean, (d) standard deviation(STD), (e) coefficient of variation (COV)

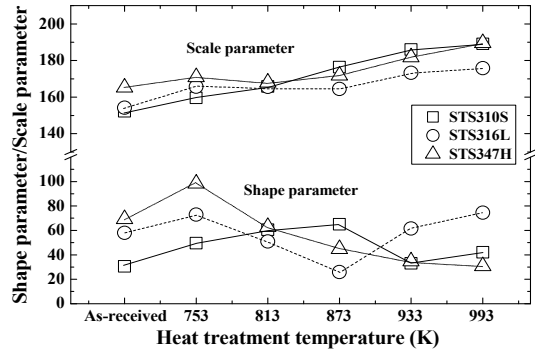


Fig. 6 Shape parameter and scale parameter according to heat treatment temperature

사용온도의 증가에 따라서 63.2%에서의 특성수명은 증가하였으나 경도의 분산이 다르게 나타나므로 사용온도에 주의해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 STS347H의 결과를 나타낸다. 열처리 시험편의 형상 파라미터는 모재에 비하여 -56~42%로 나타나 열처리 온도에 따라서 분산의 정도가 다르게 나타났다. 척도 파라미터는 2~15% 증가하여 파괴확률 63.2%에서의 경도가 증가하였다. 특히 753K 시험편의 형상 파라미터는 42%로 크게 나타나 경도의 분산이 가장 작았으며 척도 파라미터는 약 4% 증가하였다. 그에 비하여 813K, 873K, 933K 및 993K 시험편의 형상 파라미터는 각각 -9%, -35%, -50%, 및 -56%로 작게 나타나 분산이 많았으나 척도 파라미터는 각각 2%, 4%, 10% 및 15% 증가하였다. 이와 같이 STS347H는 813K 범위의 63.2%에서의 특성수명은 증가하였으나 경도의 분산은 증가하므로 고온에서의 사용은 주의해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 열처리 온도에 따른 형상 파라미터 및 척도 파라미터를 나타낸 것이다. 척도 파라미터는 3종류의 시험편에서 열처리 온도의 증가에 따라서 증가하여 63.2%에서 특성 수명이 증가하였다. 그러나 형상 파라미터는 스테인리스강 종류에 따라서 분산의 정도가 각각 다르게 나타났다. 즉 STS310S는 933K 및 993K, STS316L은 813K 및 873K, STS347H는 813K에서 모재보다 분산이 많았다. 따라서 특성수명은 증가하였지만 경도의 분산이 많이 나타나므로 사용온도에 주의해야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

입계 근처의 크롬고갈이 발생하는 753K의 온도 범위에서 인위적으로 열처리한 후 비커스 경도를 측정하고 확률론적 특성을 평가한 결과는 아래와 같다.

1) 비커스 경도는 열처리 온도가 증가함에 따라 크게 나타났다. STS310S의 인장강도는 비커스 경도와 비례하여 증가하다가 감소하였다. STS316L은 Cr탄화물의 형성이 비교적 적기 때문에 비커스 경도는 증가하지만 인장강도는 거의 비슷하게 나타났다. STS347H는 인장강도에 비례하여 비커스 경도도 함께 증가하였다.

2) STS310S의 형상 파라미터는 813K와 873K에서 60.6과 65.0으로 분산이 작고, STS316L은 753K, 933K와 993K에서 72.9, 61.6 및 74.6으로 분산이 작았다. STS347H는 753K가 3종류의 스테인리스강에서 분산이 가장 작았다. 모재와 813K는 STS310S 및 STS316L의 가장 큰 형상 파라미터보다 커서 분산이 작았다.

3) STS347H는 753K가 3종류의 스테인리스강에서 98.4로 분산이 가장 작았다. 척도 파라미터는 3종류의 스테인리스강 모두에서 열처리 온도가 증가함에 따라서 증가하였다.

References

1. J. C. Pierre, 2002, "A New Structural Material for Passenger Cars: Stainless Steel", *Auto Technology*, Vol. 2, pp. 40-42.
2. J. M. Philip, 1989, "Developing an Austenitic Stainless Steel for Improved Performance in Advanced Fossil Power Facilities", *JOM*, Vol. 41, pp. 14-20.
3. B. G. Choi, S. W. Nam and J. Ginsztler, 2000, "Life Extension by Cavity Annihilation Heat Treatment in AISI 316 Stainless Steel under Creep-fatigue Interaction Conditions", *Journal of Materials Science*, Vol. 35, pp. 1699-1705.
4. Y. S. Kim, S. Y. Lee, J. Y. Do, S. H. Ahn and K. W. Nam, 2016, "Mechanical Properties and Immersion Characteristics of Sensitized STS310S, STS316L and STS347H in the Range of 480~720°C", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 20, No. 3, pp. 43-50.
5. H. S. Kim, J. H. Yoon, J. H. Han, B. D. Mitton, R. M. Latanision and Y. S. Kim, 2004, "Influence of Chromizing Treatment on the Corrosion Behavior of AISI 316 Stainless Steel in Supercritical Water Oxidation", *Metals and Materials International*, Vol. 10, pp. 83-88.
6. La Barbera, A. Mignone, S. Tosto and C. Vignaud, 1991, "Intergranular Corrosion Behaviour of AISI 316 Stainless Steel Electron-beam Clad on Plain Carbon Steel", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 10, pp. 1370-1373.
7. E. Minkovitz and D. Eliezer, 1981, "Hydrogen-assisted Cracking of Sensitized 316L Stainless Steel", *Journal of Materials Science*, Vol. 16, pp. 2507-2511.
8. B. W. Bennett and H. W. Pickering, 1987, "Effect of Grain Boundary Structure on Sensitization and Corrosion of Stainless Steel", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 18, pp. 1117-1124.
9. A. S. Lima, A. M. Nascimento, H. F. G. Abreu and P. de Lima-Neto, 2005, "Sensitization Evaluation of the Austenitic Stainless Steel AISI 304L, 316L, 321 and 347", *Journal of Materials Science*, Vol. 40, pp. 139-144.
10. A. Kavner and T. M. Devine, 1997, "Effect of Grain Boundary Orientation on the Sensitization of Austenitic Stainless Steel", *Journal of Materials Science*, Vol. 32, pp. 1555-1562.
11. S. J. Kim, S. Y. Kong and S. Y. Lee, 2009, "Weibull Statistical Analysis of Micro-Vickers Hardness Using Monte-carlo Simulation", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No. 4, pp. 346-352.

12. K. W. Nam, S. H. Ahn and J. W. Kim, 2005, "Nondestructive Evaluation in Materials Using Time-Frequency Analysis Methods", Key Engineering Materials, Vols. 297-300, pp. 2090-2095.
13. W. T. Jung, Y. S. Kim and S. J. Kim, 2010, "Weibull Statistical Analysis of Elevated Temperature Tensile Strength and Creep Rupture Time in Stainless Steels", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 56-62.
14. S. D. Cho, S. H. Ahn, C. Y. Kang, S. J. Kim and K. W. Nam, 2017, "Weibull Probability Characteristics for Vickers Hardness of Degraded Stainless Steel", KSME Spring Conference Proceedings, pp. 353-354.
15. S. J. Kim and S. H. Ahn, 2016, "Estimation of Probability Distribution of Fatigue Lives in Crank Throw Forged Steel", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 3, pp. 29-35.
16. W. Weibull, 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", ASME J. Applied Mech., Vol. 18, pp. 293-297.
17. T. Sakai, 1992, "Statistical Properties of Material Strength", YouKenDo, Japan, pp. 33-158.