

論 文

三軸応力을 받는 延性破壞에서의 AE 發生特性에 관한 研究(第一報)

* 韓 応 教 ** 崔 萬 鎔 *** 韓 正 植

1985. 11. 30 접수

(A study on the acoustic emission and triaxial stress fields in ductile fracture) Han, Eung Kyo, Choi, Man Yong, Han Jeong Sik

ABSTRACT

In recent years the acoustic emission technique has been increasingly applied for detecting flaws and cracks in materials either under testing or in service.

It is important that what is the origin of AE signals detected by AE transducers. The purpose of this paper is to detect AE source on ductile material such as pressure vessel steel, A533B.

As the results of experimentation, the increase of AE events number is proportional to the increase of the volume of plain strain zone. The origin of AE signals is fracture of MnS inclusions which have small amplitude of AE waves.

1. 서 론

材料的 破壞와 變形에 동반하여 發生하는 音을 音響放出(Acoustic Emission)이라 하며 이것을 變換子를 通하여 檢出·解析하는 方法을 AE法이라 한다.

이 方法은 材料研究나 非破壞檢査에 使用되어 왔고 특히, 最近의 電子計測器의 發達과 더불어 材料破壞의 研究에서는 動的破壞의 情報을

제공하였고¹⁾ 非破壞試驗으로서 單一試驗片을 使用하여 破壞靱性值²⁾를 구하여 왔을 뿐만 아니라 破壞의 樣式(mode I, II, III)을 구하는 데도 응용되어 왔다.

또한, AE信號을 大量으로 處理할 수 있는 콤퓨터 시스템으로 말미암아 산업구조설비의 安全性檢査에 重要한 動的情報을 提供하여 왔다. 最近, 大型 構造物, 化學프랜트, 化學탱크등의 安全性이 社會적으로 要求됨에 따라서 이들에 대한 檢査가 非破壞試驗을 通하여 실시되어 왔으

* 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과
** 한국표준연구소 정밀계측 기기센터
*** 한국 검사개발(주) 기술이사(기술사)

며 原子炉压力容器등과 같은 構造物에서의 균열의 發生 및 進展을 미리 檢出하므로써 動的인 安全性을 檢査하는 것은 重要한 바 非破壞檢査로서는 內 압시험법, 應力측정법과 AE法이 사용되어 왔다.

压力容器의 破壞特性은 상온에서는 대부분 延性破壞의 特性을 갖고 있으며 이것은 第二相粒자를 起點으로 하는 空洞의 形成, 成長 및 合體 등의 微視的破壞로 설명되어 왔고, 第二相粒자의 分離나 破壞는 三軸應力의 大小, 체적함유율, 介在物의 分布 및 形狀에 의존한다고 報告되었다.^{1) 2)} 또한 延性破壞에서 發生하는 AE를 計測함으로써 破壞의 微視的過程을 動的으로 규명하였다. 그런데 AE 發生特性에 영향을 미치는 것은 材料破壞의 力學的條件과 材料科學的條件으로 고려할 수 있다.

Kishi 氏³⁾ 등은 高張力鋼에서 AE 發生特性을 力學的인 측면에서 報告하였는데 그것은 平面應力상태에서 發生한다고 하였다. 또한 Holt 氏⁴⁾, Ono 氏⁵⁾ 등은 力學的인 면에서 보다도 材料科學的인 측면에서 규명하여 왔다.

本 報告에서는 AE 發生을 양측면에서 규명하기 위하여 原子炉压力容器用鋼의 試驗片에 三軸應力상태의 조건을 주고 이때의 AE 發生을 變換子를 通하여 檢出·解析한 것을 第一報 로서 報告한다.

2. 實 驗

2.1 試驗材料와 試驗片

試驗材料는 原子炉压力容器用鋼 A533B 이며 그의 化學成分 및 機械的性質은 表 1 과 같다.

試驗片은 板 두께 200mm의 壓延板으로부터 그림 1 과 같이 壓延板의 中心部에서 S-T 方向으로 채취하였으며 試驗片의 크기와 形狀을 그림 2 에 表示한다. 이것은 notch部에서 三軸應力條件을 만족할 수 있도록 제작되었다. 材料의 延

표 1.

Chemical Composition (wt. %)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.21	0.21	1.38	0.01	0.006	0.64	0.09	0.52

Mechanical Properties			
σ_{ys} (MPa)	σ_B (MPa)	σ_{flow} (MPa)	δ (%)
477	628	552	28

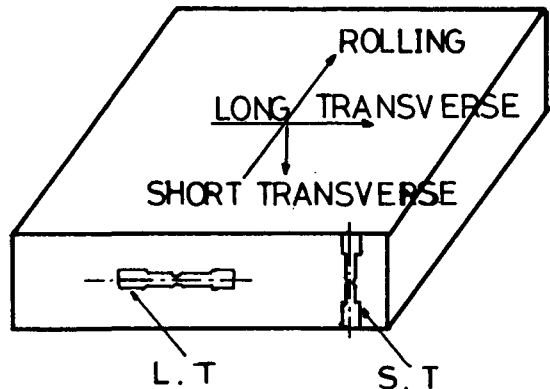


그림 1. The Orientation of The notch Tensile Specimen taken from The Rolled Plate

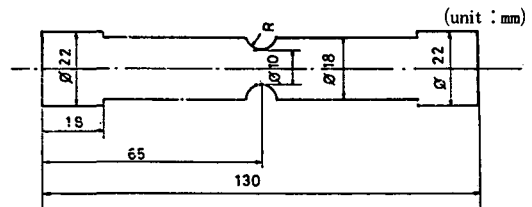


그림 2. The geometry and Dimensions of the Notched Tensile Specimen

미경조직을 관찰하기 위하여 Diamond Paste ($0.25\mu m$) 로 연마하고 나이탈液(에틸알콜 96%) 에서 約 5 초동안 부식하였고 그림 3에서와 같이 $10\sim 20\mu m$ 정도의 MnS 第二相粒자가 존재하는 것을 알 수 있으며 이는 주로 球型과 타원형으로 되어 있다. 한편, 單位體積當의 MnS 介在物의 數를 구하기 위하여 試驗片의 直交하는 三面, 즉 L-T面, L-ST面, T-ST面을 연마하고 光學현미경에 의해 肉眼 또는 Particle Counter [Luzex 401] 로 MnS 介在物을 측정하였다.

또, 1회의 測定面積은 0.5mm² 이고 각각의 면에서 60회를 측정하고 이의 結果를 平均하여 單位面積當의 介在物의 數와 單位體積當의 介在物數를 구하였다.

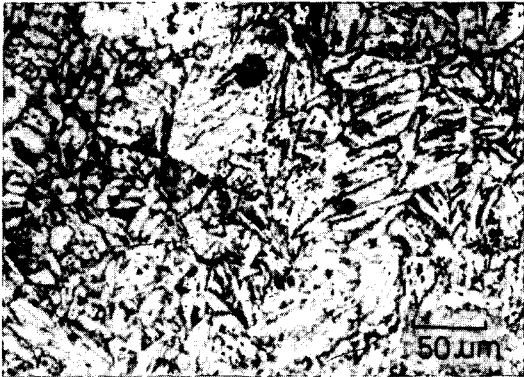


그림 3. Microstructure of Reactor Pressure Vessel Steel (A533B)

2.2 AE 計測

AE 計測은 그림 2 와 같은 試驗片에 그림 4 와 같은 共振周波數特性을 갖는 AE 變換子 (NAIS 217) 을 통하여 試驗片內의 AE 을 檢出하였다. 試驗片에서의 引張荷重은 TCM-25 變位制

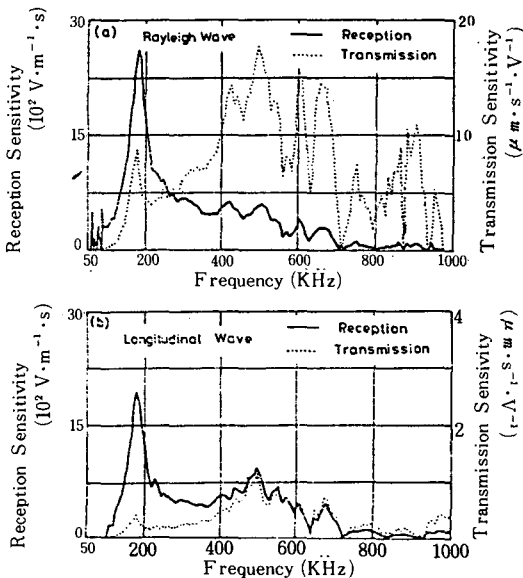


그림 4. Absolute Sensitivity Diagram of Resonant Type Transducer

御型試驗機를 통하여 주었으며 Cross head 速度는 0.5mm/min 로 하였다.

變換子를 통하여 出力된 AE 波는 周波數領域 10KHZ~1.2MHZ 인 Pre-Amp. 에서 40dB, Main-Amp. 에서 20dB 로 증폭되었고 變換子에 도달하는 AE 波의 時間差 및 잡음제거 필터에 의하여 기계적 잡음 및 전기적 잡음을 제거하였다. 本實驗에서 Threshold 值電壓은 變換子出力 100μV 에서 설정하였다. 또한, 로드셀의 出力도 AE 해석장치로 入力되었고 그림 5 는 AE 計測의 블럭다이어그램을 표시하고 있다.

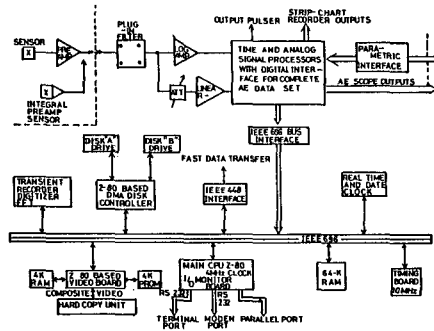


그림 5. The Block Diagram of AE Measuring System

3. 實驗結果

3.1 介在物의 크기 및數

介在物의 平均길이를 ℓ , 單位面積當數를 N_A , 單位體積當의 數를 N_V 라 할 때 $N_A = \sum_{i=1}^n N_i / (n \times S_i)$ 로 표시하며 N_i 는 S_i 의 介在物數라 하며 S_i 는 관찰 면적이다. 또한 $N_V = (2/\pi) \times Z \times N_A$ 이므로 계산하였으며 여기서 $Z = (\frac{1}{\ell})$ 이다. 三面에서의 介在物의 平均길이는 큰 差가 없었으며 材料內의 MnS 介在物은 球型과 타원형이고 이것은 壓延方向으로 신장된 MnS 의 介在物이 壓延加工中 分斷되어 大型의 MnS 가 작은 介在物로 되었다고 생각한다.

介在物의 체적함유율은 延性破壊에 큰 영향을

주는 것으로 Franklin 氏¹⁰에 의한 $V(v) = 5.4 [S(w, t\%) - 0.001/Mn](w, t\%)$ 의 관계식을 사용하면 $V(v) = 0.032\%$ 로 계산되었고 본재료에서는 Murdy 氏¹²의 실험방법에 의하여 구하였으며 그때의 값은 0.045%이었다.

表 2에는 介在物의 크기와 分布 및 數가 表示되어 있다.

표 2. The Number and Size of Inclusion on Each Face

Face	L (10 ⁻³ mm)	N _A (mm ⁻²)	Z (mm ¹)
L-T	9.06	6.8	0.131
T-ST	8.57	9.5	0.131
L-ST	8.91	8.8	0.146

$$N_v = 2/\pi \times Z \times N_A$$

3.2 AE計測結果

그림 6은 荷重의 증가에 따른 AE累積事象數와 累積에너지의 變化를 나타낸 것이다. 초기에는 AE發生이 없으나 加载작업에 따라 AE發生이 증가되어 材料의 항복점 이후에 이르러서는 포화의 값을 나타내며 試驗片의 파단이 일어날 때는 大振幅(變換子出力 1mV 이상)의 AE信號가 發生되는 것을 알 수 있다. 또한 AE累積事象數의 曲線과 AE累積에너지 變化는 유사함을 나타낸다.

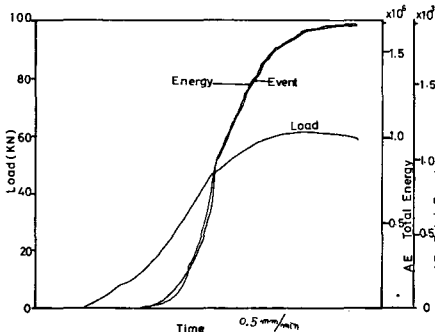


Fig. 6 AE behavior in A533B Steel Oriented to Short Transverse Direction with increasing Load

그림 6. AE behavior in A533B Steel Oriented to Short Transverse Direction with increasing Load

4. 考 察

그림 7은 A508 試驗片의 노치반지름 $\rho = 2, 4, 10$ 일때 荷重의 變化에 따른 平面스트레인領域의 확장을 표시하는 것¹¹으로 ρ 가 클수록 그의 領域은 급격히 變하는 것을 알 수 있다. 本實驗에서는 $\rho = 10$ 인 것을 使用하였으므로 平面스트레인 領域의 확장은 급격히 進行됨을 나타냈다. 또한 F. Murdy 氏¹²는 이 領域內의 모든 MnS 介在物은 破壞된다고 밝히었다.

三軸應力의 大小에 따라 破壞스트레인은 급격히 變化한다고 Bridgman¹³, Thomson¹⁴, Mackenzie¹⁵ 氏 등은 노치部를 갖는 試驗片에서 설명하였고 三軸應力이 높을 수록 破壞스트레인이 급격히 감소한다고 報告하였다.

Takahashi 氏¹⁶ AE 發生源에 대하여 周波數解析을 通하여 介在物의 破壞와 벽개 파괴등을 구분하였으나 AE波는 대부분 隱晦히 말하면 돌발波이므로 주파수 분석을 위한 입력파로서는 부적당하며 AE信號를 주파수범위가 적은 변환자를 使用하여 스펙트럼을 분석하였으므로 주파수범위가 넓은 용량형 변환자는 使用하는 것이 바람직하다고 생각된다.

本 연구의 제 1보에서는 주파수해석을 통하여 MnS의 박리나 파단을 區別하지 못하였으나 다음 제 2보에서는 명확히 하려 한다.

Fig 8은 Fig 7에서의 平面스트레인 領域의 확대에 따른 平面스트레인 體積을 荷重의 증가에 따라서 구한 것으로 여기서는 Murdy 氏의 과정과 같은 상태에서 體積을 計算하였으며 Fig 8에서 알 수 있듯이 항복이 시작되는 點에는 급격히 平面스트레인의 體積이 增加됨을 알 수 있다.

Ono 氏⁹ 및 Clark 氏¹⁷의 경우 AE發生源은 第二相粒子에 起因한다고 밝히었고 Kishi 氏의 경우 CT試驗片에서는 平面스트레인 體積에 比례하여 AE가 發生한다고 밝히었다. 그림 6-8

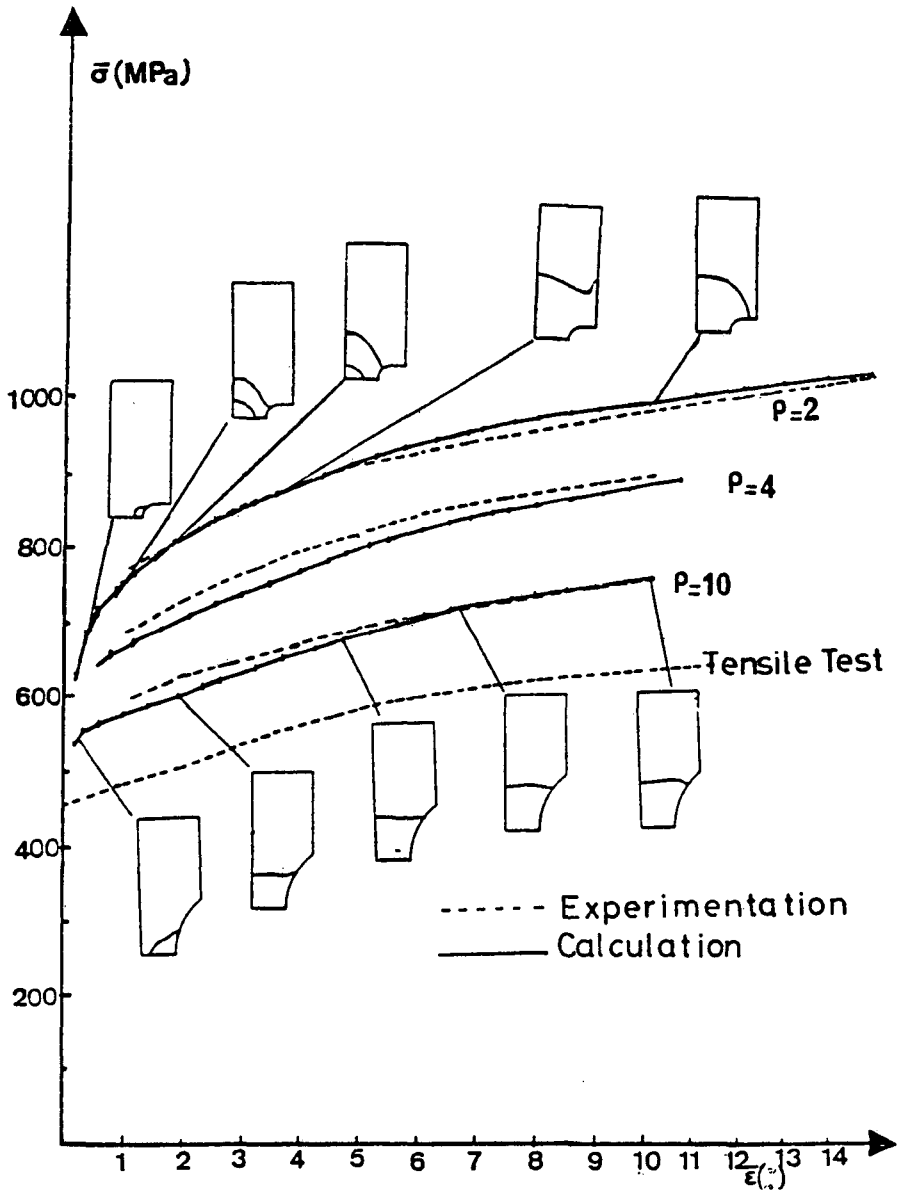


Fig 7. Comparison of the Loading Curves ($\bar{\sigma}$ vs $\bar{\epsilon}$) Calculated and obtained Experimentally: indicates the notch radius

에서 나타나는 것처럼 本試驗에서는 MnS 介在物數의 증가와 AE事象數의 증가는 비례적으로 나타나고 있으며 이의 變化도 급격함을 알 수 있다. 따라서 이것은 平面스트레인體積內的 MnS가 분리되는 破壞될 때 AE가 發生된 것이며 또한 MnS를 起點으로 形成된 空洞들이 급격히 결

합을 일으킬 때 소수의 大振幅의 AE信號가 發生되었다고 생각되며 주파수 해석을 통하여 발생원인을 명확히 밝히는 것이 바람직하다고 생각된다.

이것은 Clark氏가 報告한 空洞의 급속合體로 설명할 수 있다. 그림 8은 破面을 나타낸 것으

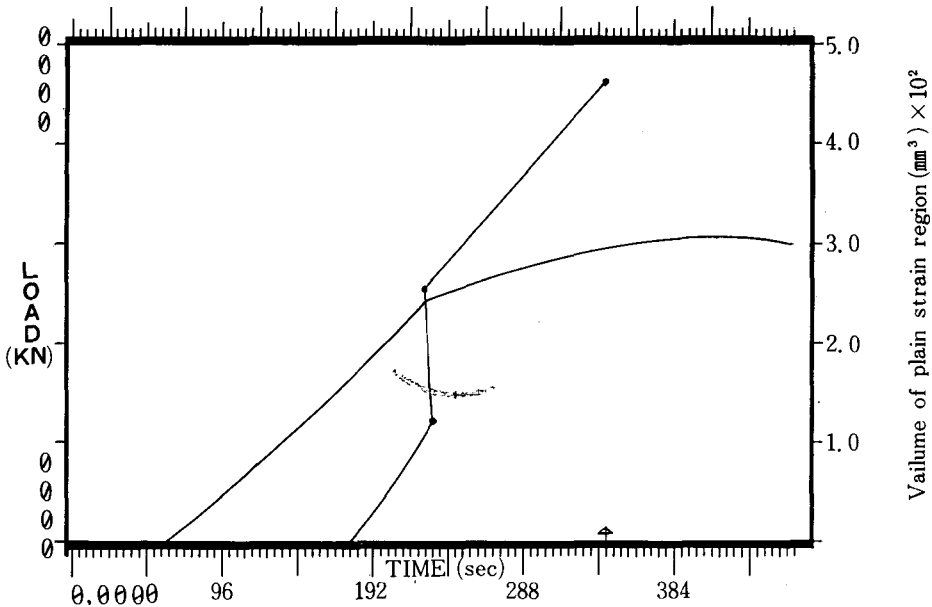


그림 8. Relation between Load and plain strain Zone Volume

로 MnS 介在物을 起点으로 잘 발달된 空洞이나 이들의 合体흔적을 관찰할 수 있다. 한편, 壓力容器的 安全감시를 AE法에 의하여 실시하는 경우 종래에는 AE發生만이 급증하면 위험하게 생각하였으나 本實驗을 통하여 알 수 있듯이 延性

破壞의 特性을 갖는 경우 작은 荷重에서 많은 小振幅의 AE가 發生한 후에도 균열의 進展은 급속히 일어나지 않는다.

그러나 취성재료는 AE發生이 급증하면 급격한 破斷을 가져온다. 그러므로 AE發生數檢討로서 壓力容器的 安全性을 評價하는 경우, 재료균열進展부의 破壞特性을 고려하여야 한다. 本第一報에서는 延性破壞의 三軸應力과 AE 發生의 關係를 $\rho=10$, 상온에서 밝혔으나 앞으로 노치의 형태 열처리 온도 및 試驗片의 채취 방향에 따라서 달리하는 AE發生상태를 규명하려 한다.



그림 9. Fractography of S-T Tensile Specimen (A 533 B)

5. 結 論

原子炉壓力容器用鋼 A 533 B의 試驗片에 引張荷重을 주고 發生되는 AE를 檢出·解析한 結論은 다음과 같다.

- 1) 三軸應力이 증가함에 따라 破壞스트레인은 감소하고 AE發生은 증가하였다. AE 發生數는 平面스트레인 體積의 증가에 비례하였다.
- 2) 平面스트레인 領域内에서 모든 介在物은

높은 三軸應力의 影響으로 破壞되어 이것이 많은 小振幅의 AE發生源으로 나타났으며 제 2 보에서는 대진폭의 AE 발생원을 규명하려 한다.

本實驗을 통하는 AE法이 破壞의 動的特性을 파악하는 데 있어 매우 有力한 것임을 確認하였다.

6. 參考文獻

- 1) T. Kishi : AE計測과 材料評價”, 日本鐵鋼協會, 西山記念, 技術講座, 1977
- 2) 彈塑性破壞靱性とAE特集, NDI, Vol 30, No.11, 1981
- 3) K. Kuribayashi, T. Kishi ; Progress in acoustic emission, JNDI (1982) pp. 295 ~ 303
- 4) M. Nagumo : Acta., Metall., Vol., 21 (1972) pp. 1661~1667
- 5) G. T. Hahn, A. R. Rosenfield : Metall., Trans. A, Vol., 6 A 1975, pp. 653~667
- 6) D. A. Curry, P. L. Pratt : Material Science Eng.) Vol., 37 (1979) pp. 223~235
- 7) 大平貴規, 本間比呂詩, 岸輝雄 : 日本金屬學會誌, Vol., 46 No.2, 1982, pp. 190~198
- 8) J. Holt, D. J. Goddard : Material Science Eng., Vol., 44 (1980) pp. 251~265
- 9) K. Ono, R. Landy, C. Ouchi : The fourth AE Symposium 1978, pp. 434~445
- 10) A. G. Franklin : Journal of the Iron and steel Institute, Feb., (1969) pp. 181~186
- 11) F. M. Bermin : Metall., Trans, A, Vol, 12 A, 1981. pp. 723~731
- 12) F. Murdy : 博士學位論文, Ecole de Mines, France, 2981
- 13) P. W. Bridgman : studies in Large Plastic Flow and Fracture, MacGraw-Hill, New York pp. 9
- 14) R. D. Thomson, J. W. Hancock : International Journal Fracture. 26, 1984, pp.99 ~112
- 15) A. C. Mackenzie, J. W. Hancock : J. Mech phys., solids, 1976, Vol., 24, pp. 147~169
- 16) H. Takahashi, M. A. Khan, M. Kikuchi : Experimental Mechanics, March, 1981, pp. 89~99
- 17) G. Clark, J. F. Knott : Metal science, Nov., 1979, pp. 531~536