

《論 文》

AE法에 의한 균열성장의 Source Wave解析에 관한 研究

韓應教^{**}, 林東圭^{**}, 崔萬鎔^{**}, 金庚錫^{*}

** 한양대 정밀기계과 정회원

* 한양대 대학원 정회원

(1984年 2月15日 接受)

Study on Source Wave Analysis in Crack Growth by AE Method

Eung Kyo Han • Tong Kyu Yim • Man Yong Choi • Kyung Suk Kim

The purpose of this paper is to decide volume of crack by AE source wave analysis. The material studied in this paper was Titanium Alloy. Transient wave memory has 50 nano sampling time. The response function of specimens and transducer was obtained experimentally by use of specimens and transducer was obtained experimentally by use of breaking pencil lead as a reference simulated AE source, and the source waves were determined in terms of energy release-time functions explicitly through a time domain deconvolution.

From experimental results, we can determine size of cracked volume.

NOMENCLATURE

- a : crack length
- B : specimen thickness
- ΔA : cracked crossed-sectional area
- Δt : lifetime of pop-in
- ΔV : volume of crack
- $D(t)$: source function due to mode I cracking
- d_{x_k} : crack opening displacement of dipole source
- E : Young's modulus
- E_{AE} : acoustic emission energy
- f_i : force of sharp pencil lead
- $f_o(t)$: source function of breaking pencil lead
- $G(t)$: transfer function of specimen and transducer
- G^d_{ijk} : transfer function for vertical force dipole source

G_{ij}^m	: transfer function for vertical force monopole source
$G_{ij}(x, t)$: Green's function of media
$g^m(t)$: response function of monopole source
$g^d(t)$: response function of dipole source
$g(t)$: response function
K	: stress intensity factor
K_{IC}	: critical stress intensity factor
m	: constant
N	: number of total event
P	: load (kgf)
P_{max}	: maximum load of crack opening displacement experiment
P_{fmax}	: maximum load of prefatigue crack experiment
r	: radius
$S_i(t, x, \tau)$: transfer function of sensor
$U_i(x, t)$: response at x
$V(t)$: sensor output voltage
v_L	: longitudinal wave velocity
V_p	: peak amplitude of the acoustic emission burst, volt
$V_o(t)$: sensor output due to breaking pencil lead
W	: width of specimen
ϕ	: crack tip opening displacement
ν	: poisson's ratio
σ_{ys}	: material yield stress
$\sigma_{ji}(x, t)$: source function at x

1. 序 論

最近 많은 非破壞檢査가 構造物의 安定性評價를 위해서 實用化되고 있다. 超音波探傷, 放射性探傷, strain測定등의 手法이 있다. 이것은 基本的으로 變形 및 構造物의 使用을 中斷 또는 終了後의 靜的狀態의 觀察을 하는데 지나지 않는다.

AE法이 近來에 와서는 균열舉動을 動的으로 把握하는데 필요한 수단으로서의 커다란 進歩가 있어 從來의 不均一, 不連續으로 進展하는 微視균열의 定量的 評價가 不可能하고 微視的 균열의 各各의 舉動 특히 動的인 微視過程의 理解가 곤란하였 으며 破壞를 材料學的 觀點에서 파악하는데 커다란 障壁이 있었으나, 근래 AE의 源波形(Source Wave)解析의 手法이 確立되어 그 解決이 可能하게 되었다.

또한 AE源波形解析으로 破壞微小時間과 energy解放量의 크기로 動的狀態를 파악하는데 이것은 실험에 의해 의사AE源에 의한 標準 step

應答形으로 探觸子 및 試驗片의 應答函數를 얻은 후 이 應答函數를 利用하여 時間領域의 deconvolution으로 에너지解放과 時間의 函數인 源波形으로 결정할 수 있다.

本 論文에서는 $\alpha - \beta$ 相 溫度領域에서 熱處理한 Ti-6Al-4V의 等軸組織의 두께 25mm인 ITCT 試驗片의 源波形實驗을 하면서 특히 定量的 균열의 크기(面積, 體積) 및 균열의 形成時刻과 균열生成의 持續時間을 求하는 Source Wave 解析을 하여 報告하는데에 그 目的을 두었다.

2. 實驗原理

破壞로 말미암아 發生하는 Source Wave와 變換子(transducer)에 依한 出力 檢出波形을 수학적인 表現을 써서 설명하기로 하자.

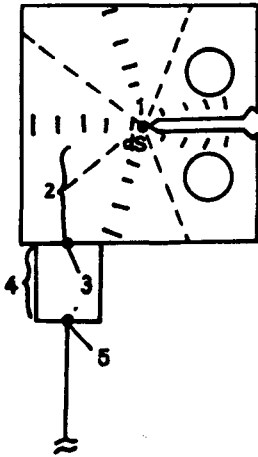
그림 1에 表示한것 같이 試驗片內의 l 方向에

垂直한 微小面積 dS_1 에서 破壞가 일어난다고 하고, $\sigma_{ji}(\vec{X}', t)$ 의 應力이 解放된다고 하자. 이 應力에 의해 發生한 彈性波가 試驗片內를 전파하여 表面上의 1點 \vec{X} 에서 $U_i(\vec{X}, t)$ 로써 計測되는 경우를 생각한다. 이 경우 $\sigma_{j1}(\vec{X}, t)$ 와 $U_i(\vec{X}, t)$ 는 試驗片의 應答函數 $G_{ij}(\vec{X}, t : \vec{X}', \tau)$ 의 개념을 導入하면 式(1)과 같이 表示된다.

$$U_i(\vec{X}, t) = \int_{\tau} \int_{S_1} G_{ij}(\vec{X}, t : \vec{X}', \tau) \sigma_{j1}(\vec{X}', \tau) dS_1(\vec{X}') d\tau \dots\dots\dots (1)$$

또 變換子의 入力 $U_i(\vec{X}, t)$ 와 出力 $V(t)$ 의 關係가 $U_i(\vec{X}, t)$ 에 의하지 않고 일정하다고 생각하면 $V(t)$ 는 變換子應答函數 $S_i(t : \vec{X}', \tau)$ 를 써서 式(2)와 같이 表示할 수 있다.

$$V(t) = \int_{\tau} \int_{S_1} S_i(t : \vec{X}', \tau) U_i(\vec{X}', \tau) d\vec{X}' d\tau \dots\dots\dots (2)$$



- 1. $\sigma_{ji}(X', t)$: Source Function at X'
- 2. $G_{ij}(X, t, X', \tau)$: Green's Function of Media
- 3. $U_i(X, t)$: Response at X
- 4. $S_i(t, X, \tau)$: Transfer Function of
- 5. $V(t)$: Sensor Output Voltage

Fig. 1 Formulation of AE system.

여기서 破壞發生領域 dS_1 이 試驗片 전체에 대하여 무시할 정도로 작아서 G_{ij} 가 \vec{X}' 에 대해 무관하다고 생각하면 式(1)은

$$U_i(\vec{X}, t) = \int_{\tau} G_{ij}(\vec{X}, t : \vec{X}', \tau) f_j(\vec{X}', \tau) d\tau \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{但, } f_j(\vec{X}', \tau) = \int_{S_1} \sigma_{j1}(\vec{X}', \tau) dS_1(\vec{X}')$$

로 표시된다. 덧붙여서 AE發生前後에 試驗片의 形狀이 不變하다고 생각하면, 位置 및 方向에 關한 項은 일정하게 되고 時間에만 關連된다. 媒體 및 變換子의 應答函數를 $g(t)$ 라고 하면 波形 $f(t)$ 에 對하여 檢出波 $V(t)$ 는 式(4)와 같이 時間에 關한 convolution으로 된다.

$$V(t) = \int_0^t g(t - \tau) f(\tau) = g(t) f(t) \dots\dots\dots (4)$$

應答函數 G_{ij}^m 은 monopole로서의 힘 f_i 와 表面變位 U_i 에 關係되고 있는것에 반하여 일반적 으로 破壞의 微視過程에서는 새롭게 形成되는 균열면의 양측에서 크기가 같은 逆方向이 同時에 解放되어지는 結果 균열開口變位 dx_k 가 발생되는 dipole source (balanced force) $D_{jk} = f_j dx_k$ 로 된다. 破壞로 일어나는 AE源波形 $D(t)$ 를 求하려면 G_{ij}^m 으로는 되지않고 D_{jk} 와 U_i 의 關係로 부터 應答函數 G_{ijk}^d 를 이용해야만 한다. G_{ij}^m 을 이미 알고있기 때문에 G_{ijk}^d 는 다음 식으로 부터 구할 수 있다.

	monopole	dipole
output	$\frac{u_i}{x}$	$\frac{u_i}{x}$
response	G_{ij}^m	G_{ijk}^d
input	$\frac{f_j}{X'}$	$dx_k \begin{matrix} \uparrow f_j \\ \downarrow -f_j \end{matrix} \quad D_{jk} = F_j dx_k$

Fig. 2 Relationship between monopole source and dipole source.

그림 2에 표시된 것 같이 dipole source D_{jk} 에는 媒體內에 있는 點 \vec{X}' 에서 $f_j(\vec{X}', t)$ 와 $-f_j(\vec{X}', t)$ 라는 2개의 힘이 作用하여 그 결과 $d\vec{X}' = dx_k \vec{e}_k$ (\vec{e}_k : k 方向의 單位 Vector)로 되어 開口變位를 가지는 微視균열이 形成되는 경우에 發生하는 表面變位 $U_i(\vec{X}, t)$ 는 式(3)을 利用하여,

$$\begin{aligned}
 U_i(\vec{X}, t) &= \int_{\tau} \{ G_{ij}^m(\vec{X}, t; \vec{X}' + d\vec{X}', \tau) \\
 & f_j(\vec{X}', \tau) + G_{ij}^m(\vec{X}, t; \vec{X}', \tau) (-f_j \\
 & (\vec{X}', \tau)) \} d\tau = \\
 & \int_{\tau} \frac{\partial G_{ij}^m(\vec{X}, t; \vec{X}', \tau)}{\partial x_k} \{ f_j(\vec{X}', \tau) dx_k \} d\tau \\
 & = \int_{\tau} G_{ijk}^d(\vec{X}, t; \vec{X}', \tau) D_{jk}(\vec{X}', \tau) \\
 & d\tau \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

여기서 G_{ij}^m 과 G_{ijk}^d 의 관계는

$$G_{ijk}^d = \frac{\partial G_{ij}^m}{\partial x_k} \dots\dots\dots (6)$$

으로 된다.

微視균열 Mode I 에서 발생되는 것이다. 여기서 縱波音速度를 V_L 로 하면,

$$\frac{\partial}{\partial x_k} = \left(-\frac{1}{V_L} \right) \frac{\partial}{\partial t}$$

가 되어

$$G_{ijk}^d = \frac{1}{V_L} \frac{\partial G_{ij}^m}{\partial t} \dots\dots\dots (7)$$

으로 된다.

따라서 Sharp pencil 芯의 壓折에서 monopole Source 에 對한 試驗片과 變換子를 일괄하는 應答函數 $g^m(t)$ 가 구해지면 AE源波形 $D(t)$ 는 檢出波形 $V(t)$ 와의 關係로 부터

$$\begin{aligned}
 D(t) &= V(t) * g_a^{-1}(t) \equiv V_L \int_0^t V(t) \\
 & * g_m^{-1}(t) dt \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

으로 求할 수 있다.

여기서 芯의 壓折의 源波形 (monopole source) 는 힘의 次元을 갖는 반면 破壞에서 발생되는 AE의 源波形 (dipole source) 은 에너지의 次元을 갖는다.

3. 實驗裝置

이 實驗에 쓰인 장치를 소개하면 다음과 같다.

- ◎ M·T·S Fatigue Machine
- ◎ Wave Memory (model WM 852 by N.F Circuit Co.)

- ◎ Main Amplifier (model 105 plus by KEITHLEY Instrument)
- ◎ AE Data Processor (model 4500 by NAIS)
- ◎ Fractography by S.E.M.
- ◎ Optical Microscope
- ◎ Micro Computer (model 9835A by HEWLETT PACKARD)
- ◎ 接着劑 ; electron Wax
- ◎ 變換子 (sensor)

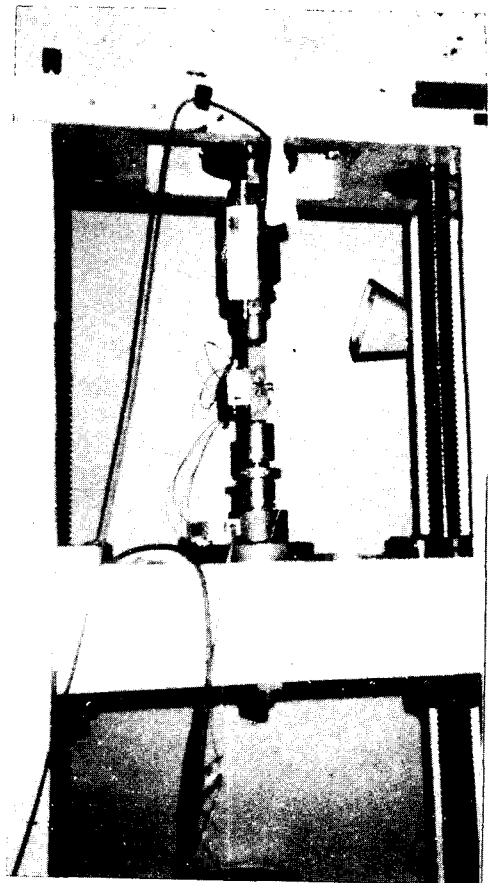


Photo 1
Experimental apparatus for source wave analysis

장치에 대하여 설명하면 AE信號로서 취급되는 周波數는 通常은 數10 KHz ~ 1MHz 의 범위로 넓기 때문에 AE波의 檢出에는 壓電性의 變換子를 사용하는 것이 일반적이다. 本 實驗에서는 NF 제

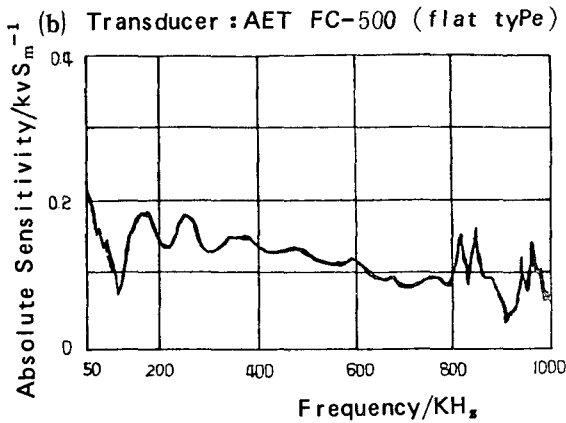


Fig. 3 Frequency responses of transducers.

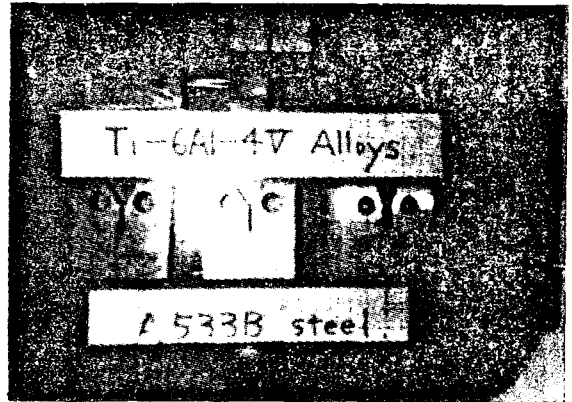


Photo 2 Photo of specimen used in experiment (Ti-6Al-4V and A533B)

작품인 廣帶域 평탄형 sensor FC 500을 使用하였다.

그림 8은 실제 試驗片을 사용하여 破壞靱性試驗을 한 結果를 荷重 - COD曲線으로 나타낸 것이다.

그림 8에 表示된 ①②③④⑤의 경우 중에서 임의로 ③④번을 선정하여 AE 源波形을 검출하였다.

그림 7에 의해 源波形 解析의 Flow chart에 表示된 것과 같이 計算處理가 된다. 그래서 그림 11과 같이 源波形 $D(t)$ 를 얻을 수 있다.

破壞의 微視過程은 균열이 進展을 시작하여 정지할 때 까지 微小時間 Δt 가 strain energy가 解放되어 끝났다고 생각되어 energy 放出量 時間

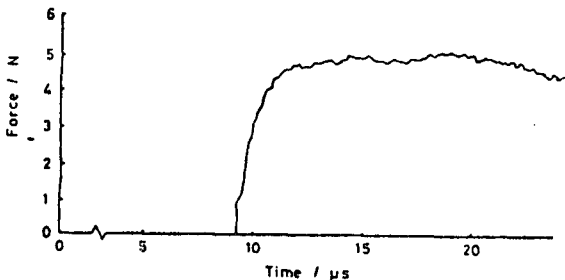


Fig. 6 Source force time-function of Pencil lead.

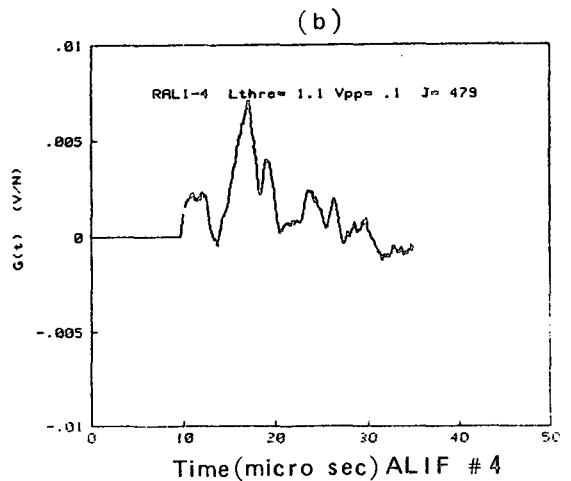
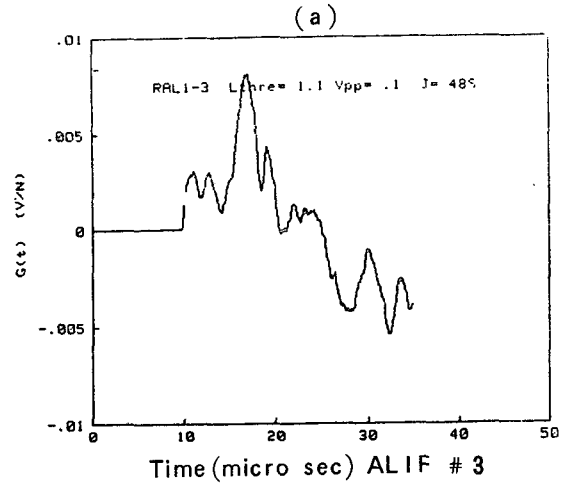


Fig. 7 Step response of specimen and transducer.

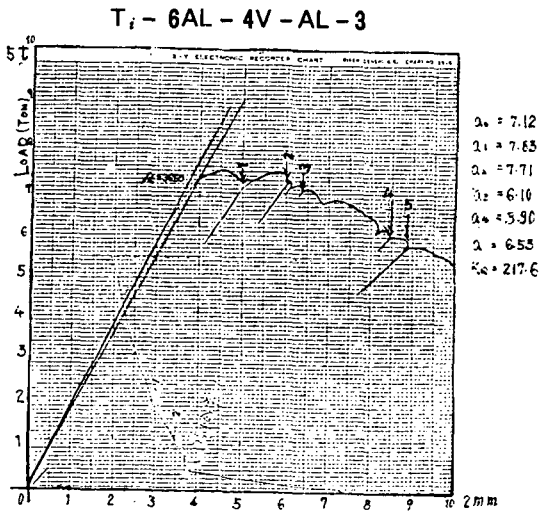


Fig. 8 Typical diagram of Load-displacement.

曲線은 有限時間 Δt 의 입상과를 가지는 step function 으로 된다.

그림 11로 부터

$\Delta t = 1.47 (\mu sec)$, $\Delta D(t) = 0.033 (J)$ 로 된다.

4. 實驗方法

等軸 Ti-6Al-4V의 ITCT試驗片에 붙이는 變換子는 약 50KHz~3MHz의 범위에서 거의 평탄한 縱波速度를 가지는 AET社의 FC500을 使用하였다. POP-in에 起因하는 아주 큰 振幅의 AE (Acoustic Emission)가 發生하기 때문에 計測系에서 飽和하는 것을 피해야만 한다. 精度를 미세하게 하기 위해서 filter를 쓰지않고 증폭기를 통해서 micro computer로 data가 흐르게 된다.

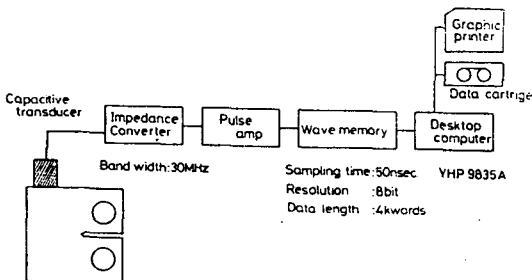


Fig. 9 Block diagram of source wave analysis system.

그림 9는 源波形解析 system의 block diagram이다.

檢出波形에서 源波形을 求하는 方法은

$$f(t) = \int_0^t V(\tau) g^{-1}(t-\tau) d\tau$$

인 式(4)를 그대로 使用하여 구한다. 이경우 Convolution 式은 $V(t) = g(t) * f(t)$ 에서 $V(t), f(t)$ 를 sampling period로서 離散化한 n차원의 nxn 行列로써 計算한다.

$$\begin{bmatrix} V(1) \\ V(2) \\ \vdots \\ V(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(1) & 0 & \dots & 0 \\ g(2) & g(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g(n) & g(n-1) & \dots & g(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(1) \\ f(2) \\ \vdots \\ f(n) \end{bmatrix} \dots (4)$$

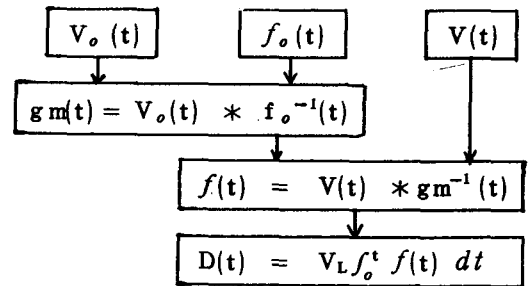


Fig. 10 Flow chart of AE source wave analysis

실제의 計算은 그림 10에 表示한 것과 같이 computer를 使用하여 D(t)를 구한다. 여기에서 試驗片 및 變換子의 決定은 Pencil lead의 壓折에 依해서 實驗的으로 결정할 수 있다.

5. 實驗結果

應答函數를 求하려면 의사AE源 $f_o(t)$ 를 入力信號로 加해질때 出力 $V_o(t)$ 를 計測하여 $g(t)$ 의 계산식 $g(t) = \int_0^t V_o(t) f_o^{-1}(t-\tau) d\tau$ 에 의해 $g(t)$ 를 구한다.

$f_o(t)$ 를 發生하도록 하는 의사AE源이 구비해야 할 조건은

- 가. 간편할것
- 나. 再現性이 있는것
- 다. 物理量으로 명확하고 計測가능할 것.

라. 對象으로는 周波數범위를 총 망라하는 것. 등이다.

sharp pencil lead의 壓折源波形 $f_o(t)$ 가 Knopoff에 의해 解析的으로 얻을 수 있다. 無限板으로 볼 수 있는 7475 厚板 (500×500×60 mm)과 容量形變換子를 利用하여 구한 結果가 그림 6에 表示되어 있다. $f_o(t)$ 는 약 1 μ S 사이에서 약 5 N의 step function으로 된다. 그림 7은 $f_o(t)$ 와 $V_o(t)$ 에 의해서 구해진 $g(t)$ 를 表示하고 있다.

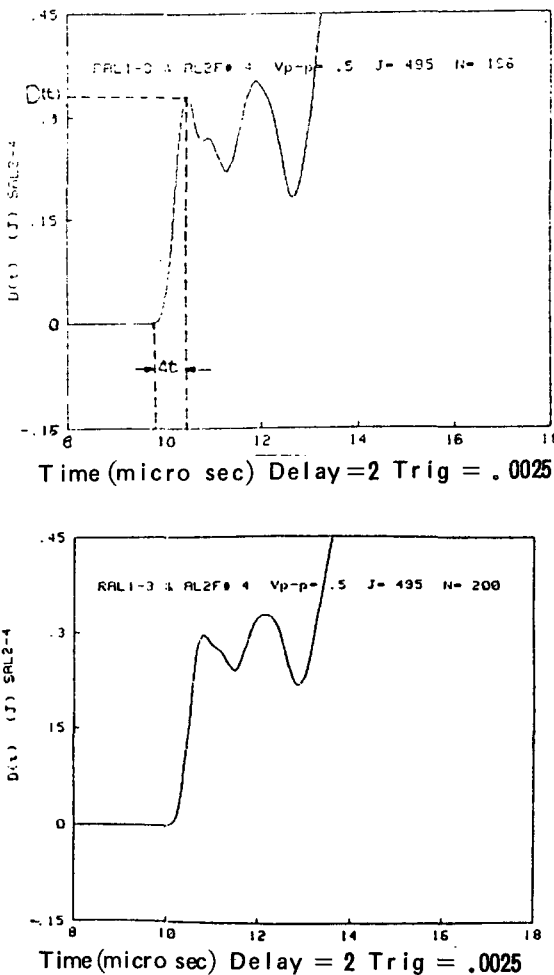


Fig. 11 Source wave form due to Crack growth at #3, #4

6. 考察 및 結論

균열의 形狀을 그림 12과 같은 미세한 타원구라고 생각하면 시험결과에서 $\Delta D(t) = 0.33(J)$
 $\Delta t = 1.47 (\mu sec)$ 이므로,

$$\Delta V = \frac{D}{E} = \frac{0.33 N \cdot m}{1,09765 \times 10^{11} N/m^2} = 3.0 \times 10^{-4} (m^3)$$

$$\text{또 } \Delta V = \frac{8\pi(1-\nu^2)\sigma_{ys}}{3E} a^3 \text{ 이므로}$$

$$a = \left[\Delta V \cdot \frac{3E}{8\pi(1-\nu^2)\sigma_{ys}} \right]^{1/3} = \left[\frac{3 \times 3 \times 11,200}{8\pi(0.91) \times 93} \right]^{1/3} \times 10^{-4} = 361.9 (\mu m)$$

$$\phi = \frac{2(1-\nu^2)\sigma_{ys}}{E} a = \frac{2(0.91) \times 93}{11,200} \times 361.9 = 5.46 (\mu m)$$

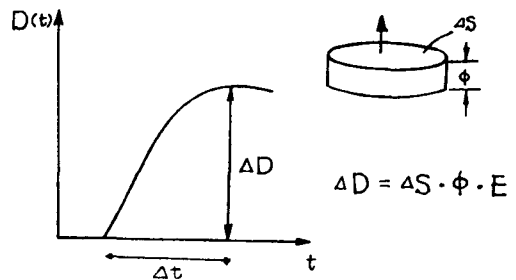


Fig. 12 Relationship between t and D(t) in elliptical sphere

이상에서 $\sigma_{ys} = 93 (kg/mm^2)$, $E = 11,200 (kg/mm^2)$
 $\nu = 0.3$ 이다.

結論的으로 $\alpha - \beta$ 溫度에서 壓延 加工한 等軸 Ti-6Al-4V의 ITCT 試驗片을 使用한 균열發生點에서 발생된 AE의 Source Wave 解析法의 定量값을 求하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

Source Wave 解析에 따라 균열의 動的狀態에 對한 定量的인 값을 얻을 수 있었다. 만일 그 현상이 橢圓球과 近似하다면 a 는 300~400 μm , ϕ 는 5~10 μm , Δt 는 1.47~1.6 μsec 로 나타났다.

끝으로 本研究에 있어서 東大 岸揮雄 教授 研究室의 大平氏의 指導, 協助에 대해 感謝드리는 바이다.

7. 參考文獻

1. 尾上守夫 ; “アコースティック・エミジョンの基礎と應用” 1977. コロナ社.
2. 岸輝雄 ; “金屬資料” 16-10・107(1976)
3. “Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems” STP 697, ASTM (1979)
4. Gerberich, W.W, D.G Atleridge and J.F Lessar ; Metallurgical Trans. A, 6A 797 (1975)
5. 大平貴規, 岸輝雄, 非破壊検査 28, 292 (1979)
6. Harris, D.O, and H. L. Dunegen ; Expl. Mech. 14. 71 (1974)
7. T. Kishi and T. Ohira ; “Oynamic Crack Growth during Pop-in Fracture in 7075 Aluminium Alloy” TRANSACTIONS OF THE JAPAN INSTITUTE OF METALS Vol. 24 No. 4, April, 1983.
8. T. Kishi ; “Dynamic Fracture Characterization during Microcrack Formation by Acoustic Emission Source Wave Analysis” Proceediny of the 1982. Joint Conference of Experimental Mechanics