

超音波를 利用한 薄膜두께 測定에 關한 研究

韓應教* 李在峻** 金在烈**

A Study on the Thickness Measurement of Thin Film
by Ultrasonic Wave

Eung Kyo Han, Jae Joon Lee and Jae Yeol Kim

Abstract Recently, it is gradually raised necessity that thickness of thin film is measured accurately and managed in industrial circles and medical world. In this study, regarding to the thickness of film which is in opaque object and is beyond distance resolution capacity, thickness measurement was done by MEM-cepstrum analysis of received ultrasonic wave. In measurement results, film thickness which is beyond distance resolution capacity was measured accurately. And within thickness range that don't exist interference, thickness measurement by MEM-cepstrum analysis was impossible.

a_i : reflection intensity
 C : velocity of ultrasonic wave
 f : frequency of probe
 l : thickness of thin film
 P_o : sound pressure of incident wave
 P_{rn} : sound pressure of nth reflected wave
 P_{tn} : sound pressure of nth transmitted wave
 r_1 : sound pressure reflection coefficient on boundary B_1
 r_2 : sound pressure reflection coefficient on boundary B_2
 $s(t)$: incident wave form

$S(f)$: fourier transform of $s(t)$
 $S_{xx}(f)$: power spectrum of $s(t)$
 T_1 : transmission coefficient on boundary B_1
 $x(t)$: multiple reflection wave
 $X(f)$: fourier transform of $x(t)$
 $X_{xx}(f)$: power spectrum of $x(t)$
 Z_1 : acoustic impedance of medium 1
 Z_2 : acoustic impedance of medium 2
 Z_3 : acoustic impedance of medium 3
 λ : wave length of ultrasonic wave
 τ_i : delay time in thin film

1. 緒 論

오래전부터 薄膜의 製作과 두께測定の 基本的인 技術은 多數 研究되어왔다. 近年들어 特히 薄膜製作의 技術은 急速히 發達하여 物理學의 實驗技術의 一部로서 또는 工業分野에 있어서도 큰 比重을 차지하게 되어 薄膜의 두께를 測定하

여 管理할 必要性이 생기게 되었다. 또 醫療分野에 있어서도 혈관벽 등, 生體內的 薄膜의 두께를 測定하고자 하는 움직임이 있어 薄膜의 두께를 精度 좋게 測定하는 方法의 開發이 要望되고 있다. 從來의 薄膜두께 測定法에는 差動 트랜스를 利用한 觸針式膜두께測定法, MBI (Multiple Beam Interferometry)法, QCO (Quartz

* 漢陽大學校 精密機械工學科 教授 ** 漢陽大學校 大學院
接受 : 1988年 1月 20日

Crystal Oscillator)法, 偏光解析法^{1), 2)} 등이 있다. 그러나 이러한 방법은 IC Package 内の Chip의 접착층의 두께나 生體內的 薄膜等 不透明한 物體內에 存在하는 薄膜의 두께測定에는 適用이 不可能하다. 超音波를 利用한다면 不透明한 物體內的 膜두께의 測定이 可能하지만 膜의 두께가 超音波 Pulse의 距離分解能보다 얇은 경우에는 A mode의 方法으로는 測定이 困難하다. 이와같은 경우 薄膜으로부터의 反射波를 spectrum解析함으로써, 距離分解能 以下에서도 薄膜의 두께를 測定하는 것이 可能하다. 이제까지 薄膜의 두께測定에 關한 spectrum解析은 여러사람에 의해 研究되어왔다. 예를들면 안과영역에 있어서 澁谷³⁾가, 또 工業分野에 있어서 표면근처 缺陷의 檢出에 L. Paradis와 Y. Serruys^{4), 5)}가 FFT-Cepstrum法의 適用을 제안하고 있다. 그러나 一般的으로 超音波 Pulse의 주파수대역이 좁기 때문에 FFT-Cepstrum法은 分解能의 점에 있어서 한계가 있다.

따라서 本 論文에서는 이 問題를 解結하기 위한 하나의 方法으로서 Cepstrum을 求하기 위해서 MEM (Maximum Entropy Method)⁶⁾을 利用하였다. 薄膜 Model로서 水膜을 人工적으로 만들어 實驗하였으며 MEM-Cepstrum法에 의해 薄膜의 두께測定을 시도하였다.

2. 理 論

2.1. 薄膜反射理論

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 音響 impedance Z_1 의 媒質 1 및 音響 impedance Z_3 의 媒質 3 사이에 音響 impedance Z_2 , 두께 ℓ 의 媒質 2가 介在하는 Model에 超音波가 入射한 경우에 對해서 生覺해 보자.

媒質 2의 前面에서의 反射波 P_{r0} 와 媒質 2 中에서의 多重反射波 $P_{r1}, P_{r2}, \dots, P_{rn}$ 은 各各 $2\ell, 4\ell, 6\ell, \dots, 2n\ell$ 의 beam路程差가 있고 또한 境界面 B_1 에서의 왕복투과손실 및 境界面 B_1, B_2 에서의 反射回數에 對應한 反射損失을 받는다. 그러므로 媒質 2 中에서 超音波의 波長을 λ , 入射한 超音波의 音壓을 P_0 라고 하면 各各의 反射波는 式(1)과 같이 表示되어 진다.

$$\left. \begin{aligned} P_{r0} &= r_1 P_0 \\ P_{r1} &= r_2 \cdot T_1 \cdot P_0 \cdot e^{2 \frac{2\pi\ell}{\lambda} j} \\ P_{r2} &= -r_1 \cdot r_2^2 \cdot T_1 \cdot P_0 \cdot e^{4 \frac{2\pi\ell}{\lambda} j} \\ P_{r3} &= r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot T_1 \cdot P_0 \cdot e^{6 \frac{2\pi\ell}{\lambda} j} \\ &\vdots \\ P_{rn} &= (-1)^{(n-1)} r_2^n \cdot T_1 \cdot P_0 \cdot e^{2n \frac{2\pi\ell}{\lambda} j} \end{aligned} \right\} \dots(1)$$

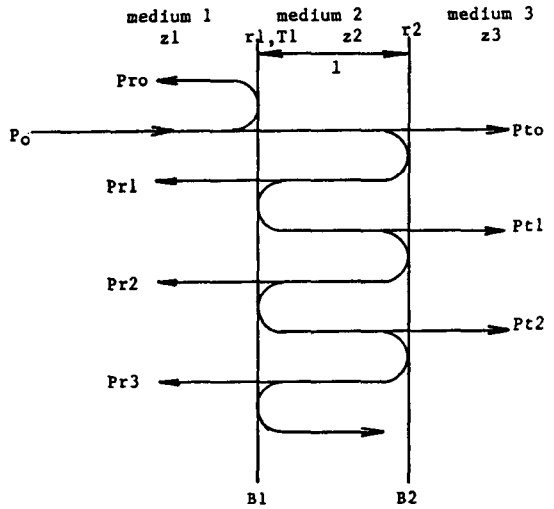


Fig. 1. Multiple reflection of ultrasonic waves in thin film.

여기서 r_1 과 r_2 는 各各 境界 B_1, B_2 에서의 音壓反射率이고 T_1 은 境界 B_1 에서의 왕복투과율이다. 媒質 2로부터의 合成反射波 P_r 은 式(1)의 무한급수의 合이 되어 式(2)와 같이 表示된다.

$$P_r = r_1 P_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{ (-r_1)^{(n-1)} \cdot r_2^n \cdot T_1 \cdot P_0 \cdot e^{2n \frac{2\pi\ell}{\lambda} j} \} \dots\dots\dots (2)$$

그러므로 박막상매질 2에 있어서 反射率 $|r_e|$ 는 式(3)과 같이 된다.

$$|r_e| = \left| \frac{P_r}{P_0} \right| = \sqrt{1 - \frac{4 \frac{Z_1}{Z_3}}{\left(\frac{Z_1}{Z_3} + 1\right)^2 \cos^2\left(\frac{2\pi\ell}{\lambda}\right) + \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi\ell}{\lambda}\right)} \dots\dots\dots (3)$$

또 式(3)에 $\lambda = \frac{c}{f}$ 를 代入하면 式(4)와 같이 된다.

$$|r_e| = \frac{\sqrt{1 - \frac{4 \cdot Z_1}{Z_3}}}{\sqrt{\left(\frac{Z_1 + 1}{Z_3}\right)^2 \cos^2\left(\frac{2\pi f \cdot \ell}{C}\right) + \left(\frac{Z_1 + Z_2}{Z_3}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi f \cdot \ell}{C}\right)}} \quad (4)$$

本 研究에서 使用하는 水膜 model에 式(4)를 適用하여 $|r_e|$ 와 $f \cdot \ell$ 의 關係를 求한 것이 Fig.

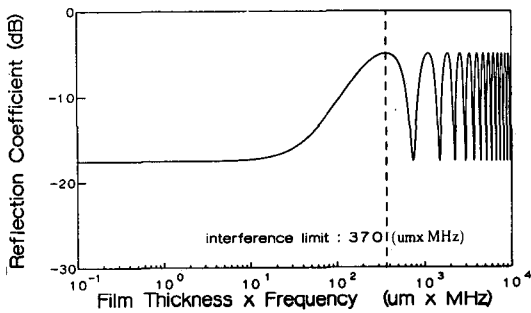


Fig. 2. Relation between $f \cdot \ell$ and reflection coefficient .

2이다. Fig. 2로부터 어느 $f \cdot \ell$ 의 값보다 작은 경우에는 $|r_e|$ 가 一定한 값으로 되는 것을 알 수 있다.

2.2. Cepstrum法을 利用한 薄膜두께 測定理論

薄膜으로부터의 合成反射波를 $X(t)$, 基本波를 $S(t)$, 反射強度를 a_i , 지연시간을 τ_i 로 하면 $X(t)$ 는 式(5)로 表示된다.

$$X(t) = S(t) + \sum_{i=1}^n a_i \cdot S(t - \tau_i) \dots\dots\dots (5)$$

式(5)의 양변을 Fourier 變換하면 式(6)과 같이 表示된다.

$$X(f) = S(f) \left[1 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot e^{-j2\pi f \tau_i} \right] \dots\dots\dots (6)$$

式(6)으로부터 $X(t)$ 의 Power spectrum을 計算하면 式(7)과 같이 된다.

$$X_{xx}(f) = S_{xx}(f) \left[1 + \sum_{i=1}^n a_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cdot \cos 2\pi f (\tau_i - \tau_j) \right] \dots\dots\dots (7)$$

式(7)의 代數를 취하면 式(8)과 같이 되어 基本波의 Power spectrum과 지연시간차에 對應하는 quefrequency를 갖는 주파수제열로 분리하는 것이 可能하다.

$$\log X_{xx}(f) = \log S_{xx}(f) + \log \left[1 + \sum_{i=1}^n a_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cos 2\pi f (\tau_i - \tau_j) \right] \dots\dots\dots (8)$$

그러므로 式(8)을 한번 더 fourier 變換하여 quefrequency軸上에서 지연시간에 對應하는 quefrequency가 求해져 薄膜內에서의 音速을 안다면 그 두께를 計算하는 것이 可能하다.

3. 實 驗

3.1. 實驗裝置

本 實驗에 使用된 實驗裝置의 세원은 다음과 같다.

- 1) Pulser : MP 215 (Metrotex)
- 2) Receiver : MR 106 (Metrotex)
- 3) Digitizer : 2430 (SONY-Textronix)
- 4) Computer : 310 (Hewrett Pakad)
- 5) Disk driver : 9122 (Hewrett Pakad)
- 6) Probe : 2.25 C12.7N, 10C 12.7N (Hitachi)
- 7) Plotter : 7550A (Hewrett Pakad)

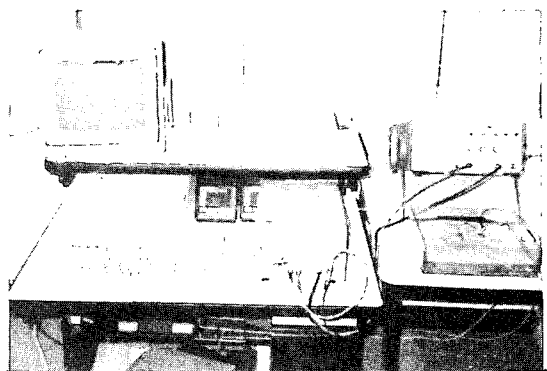


Photo. 1. Experimental apparatus .

Photo. 1은 實驗裝置이며, Photo. 2는 水膜을 製作하는데 使用한 thickness gauge, polystyrol block, acryl plate와 probe를 表示한다.

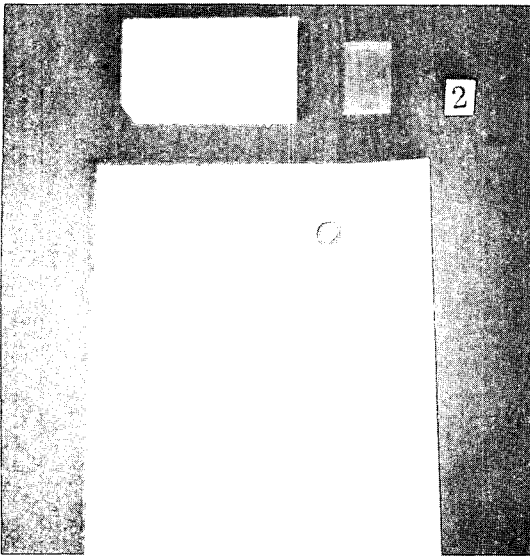


Photo. 2. 1) polystyrol block 2) acryl plate
3) thickness gauge 4) probe

3. 2. 實驗方法

Fig. 3과 같이 물을 가득 채운 수조를 準備하여 두께 10mm의 acryl plate와 두께 50mm의 polystyrol block 사이에 똑같은 2장의 thickness gauge를 끼워 그 간격에 水膜을 만들어 薄膜 Model로 하였다. 水膜의 두께를 10~100 μm (10μm pitch), 100~1000μm (100μm pitch), 250~950μm (100μm pitch)로 變換시켰다. probe는 2. 25 C 12. 7N, 10C 12. 7N을 使用하였다.

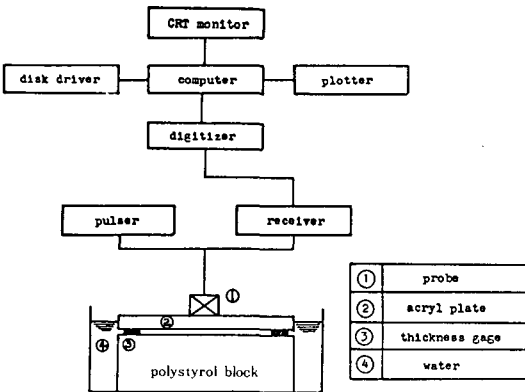


Fig. 3. Block diagram of experimental apparatus.

實驗은 1探觸子法으로 行하였다. probe로 부터 방출된 超音波 pulse는 acryl plate를 통하여 水膜에 反射되어 probe에 受信된다. 受信된 反射波를 receiver에서 증폭한 다음 digitizer에 入力하여 2. 25 C 12. 7N, 10C 12. 7N의 probe에 對하여 10 nsec 간격으로 Sampling을 行하였다. Sampling된 data를 GPIB (General Purpose Interface Bus)를 거쳐서 Computer에 전송하여 解析을 行하였다.

3. 3. Data 解析

Fig. 4에 나타낸 MEM-Cepstrum의 algorithm에 의해 data를 解析하였다. 반사파형 X(t)와 입사파형 S(t)의 Power spectrum을 FFT를 利用하여 求한 後에 基本波의 Power spectrum을 利用하여 反射波의 Power spectrum을 정규화 하였다.

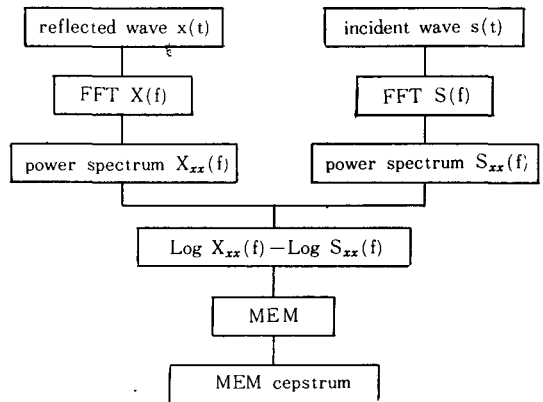


Fig. 4. Algorithm of MEM-cepstrum analysis.

또한 Cepstrum을 求하는 方法으로 짧은 data에서도 分解能이 좋고 안정도가 높은 MEM을 利用하였다. time window로서는 式(9)에 나타낸 Hanning window를 使用하였다.

$$W_{HAN}(n) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi n / (N-1)) \dots (9)$$

또 Spectrum의 平滑화를 위해서 式(10)에 表示한 Hanning digital filter를 利用하였다.

$$f(n) = 0.25f(n-1) + 0.5f(n) + 0.25f(n+1) \dots (10)$$

4. 實驗結果 및 考察

Fig.5 및 Fig.6에 探觸子가 2.25C 12.7N 및 10C 12.7N 의 경우 薄膜으로부터의 反射波를 MEM-Cepstrum解析한 結果를 나타낸다.

薄膜의 두께는 모두 500 μm 의 경우이다. Fig.5 중 (a)는 入射한 超音波 pulse의 基本波形 S(t), (b)는 水膜으로부터의 反射波形 X(t)를 나타낸다. 이 그래프로부터 膜이 얇아 超音波 pulse의 거리분해능 이하의 경우 X(t)는 水膜內에서의 多重反射에 의해 간섭과형으로 되어 원과형으로부터 직접 膜두께를 測定하는 것이 不可能함을 알 수 있다. (c)와 (d)는 各各 (a),(b)의 波形을 FFT를 使用해서 求한 Power spectrum이다. 基本波形의 Power spectrum S_{xx}(f)으로부터 求한 各 探觸子의 中心周波數 및 주파수대역은 다음과 같다.

○ 2.25C 12.7N { 중심주파수.....2.393MHz
주파수대역...約 1 ~ 5 MHz

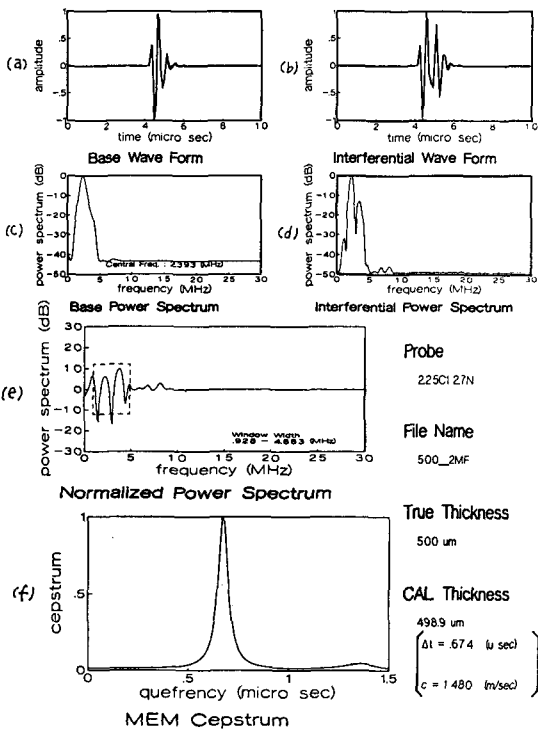


Fig. 5. Result of MEM-Cepstrum analysis in case of probe 2.25 C 12.7N, thickness 500 μm .

○ 10 C 12.7N { 중심주파수...5.176MHz
주파수대역...約 1~10MHz

Sampling 整理로 부터 波形이 갖는 주파수대역의 상한치를 W(Hz)로 하면 波形信號를 標本化하는데 최소로 必要한 Sampling time Δt_{max} (sec)는 다음 式으로 求해진다.

$$\Delta t_{\text{max}} = 1/2W$$

本 實驗에 使用한 探觸子의 上限周波數 W는 10MHz이기 때문에 $\Delta t_{\text{max}} = 50\text{nsec}$ 로 되어 本 實驗에서 設定한 Sampling time $\Delta t = 10\text{nsec}$ 는 적절하다고 말할 수 있다. (e)는 X_{xx}(f)을 S_{xx}(f)으로 정규화한 spectrum이다. 이와같이 정규화를 행함으로써 X_{xx}(f)으로부터 S_{xx}(f)成分이 제거 가능하여 周波數軸上에서 지연시간차에 對應한 周波數系列만을 얻는 것이 可能하다.

정규화 spectrum의 周波數 window를 2.25C 12.7N의 경우 0.928~4.883MHz, 10C 12.7N의 경우는 1.27~10.938 MHz로 하였다. (f)는

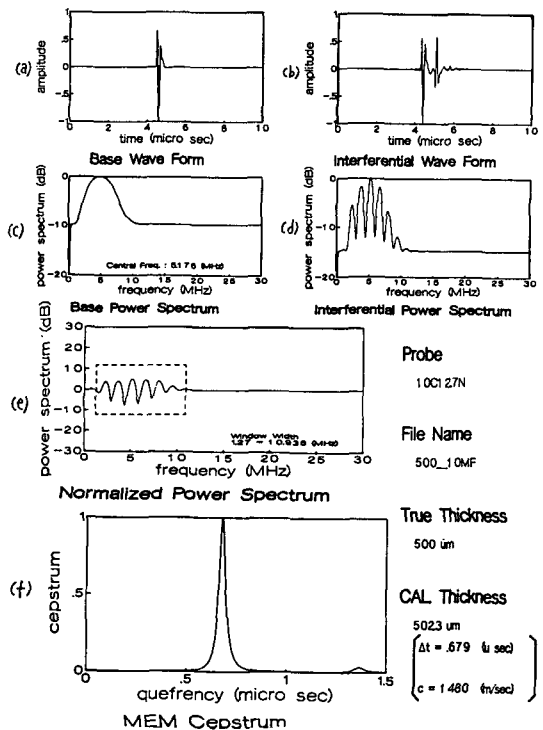


Fig. 6. Result of MEM-cepstrum analysis in case of probe 10C 12.7N, thickness 500 μm .

周波數 Window內的 周波數系列을 MEM을 利用하여 算出 Cepstrum이다. 이와같이 quefreny軸上에서 지연시간 $\Delta \tau$ 에 對應하는 impulse가 求해져 Peak位置의 quefreny값은 超音波가 水膜內를 往復傳播한 時間에 相當한다. Cepstrum의 Peak位置로부터 求한 2.25C12.7 N 및 10C 12.7N의 $\Delta \tau$ 는 各各 0.647 μ sec, 0.679 μ sec이기 때문에 물의 音速을 1480m/sec로 하여 이것의 값으로부터 算出한 水膜두께는 各各 498.9 μ m, 502.3 μ m로 되었다. true thickness와의 誤差는 0.22% 및 0.46%로 되어 높은 精度로 膜두께 測定이 可能하였다.

Fig. 7은 true thickness와 MEM Cepstrum 法에 의해 求해진 $\Delta \tau$ 로부터 計算한 膜두께를 比較한 그래프이다. 그래프로 부터 막두께가 두꺼운 部分에서는 양자는 잘 一致하고 있지만 얇은 部分에서는 어느 一定值로 됨을 알 수 있다. 이 理由를 以下에 考察하면 Fig. 2에 있어서 $f \cdot \ell = 370$ 을 境界로 하여 그것보다 $f \cdot \ell$ 가 작은 영역에서는 反射率이 一定值로 되기 때문에 反射波形 X(t)는 入射波形 S(t)와 거의 같게 되어 양자의 差가 없게 된다.

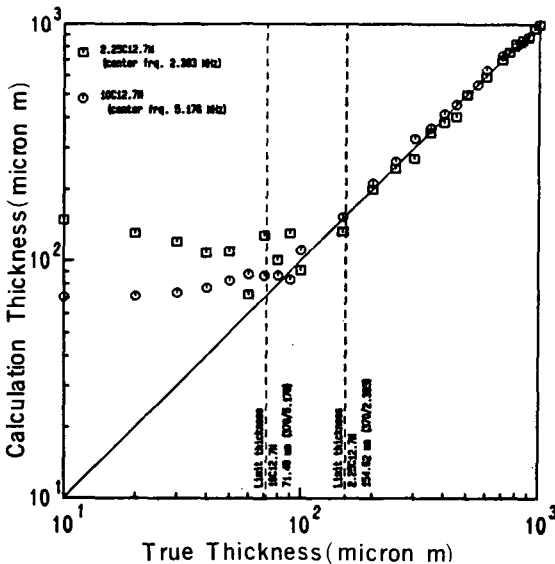


Fig. 7. Comparison of true thickness with calculation thickness.

그러므로 X(t)의 Power spectrum $X_{xx}(f)$ 와 S(t)의 Power spectrum $S_{xx}(f)$ 도 거의 같

게 되기 때문에 정규화 spectrum의 周波數軸上에서 지연시간에 對應한 周波數系列은 매우 擴大되어 퍼지게 된다. 그래서 낮은 周波數의 超音波를 利用한 計測에서는 지연시간의 檢出이 어렵게 된다. 이것을 증명하기 위한 data로서 10C 12.7N를 利用하여 $\ell = 10\mu$ m 및 $\ell = 40\mu$ m인 경우의 解析結果를 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다. 이 그래프로 부터 알 수 있듯이 S(t)와 X(t)는 거의 같게 되어 정규화 Spectrum의 周波數軸上에서 周波數系列은 擴大되어 퍼져있어 명료한 dip가 나타나지 않고 ℓ 값에 關係없이 거의 같은 形狀을 하고 있다. 그 때문에 quefreny軸上에서 精確한 지연시간을 檢出하는 것이 不可能하기 때문에 거의 같은 값이 나타나게 된다. 이 사실로부터 使用하는 探觸子의 주파수에 依해 檢出可能한 限界의 지연시간이 存在하는 것을 알 수 있다.

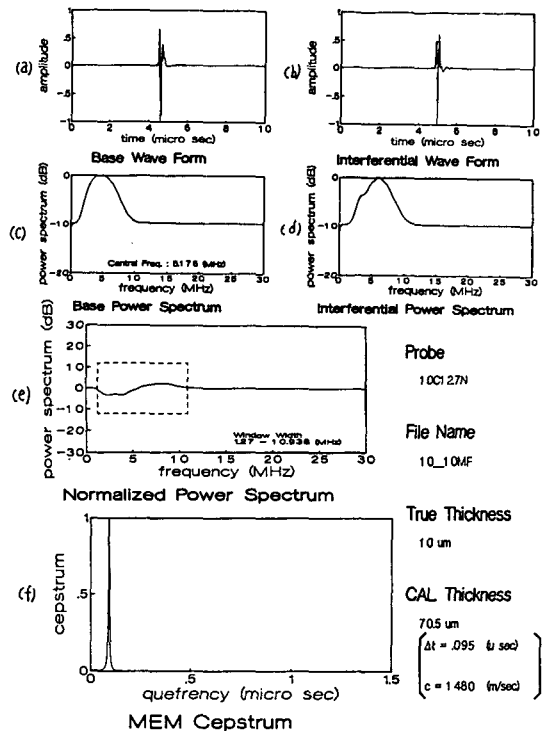


Fig. 8. Result of MEM-cepstrum analysis in case of probe 10C12.7N, thickness 10 μ m.

本 研究에서는 Fig. 2에 있어서 $f \cdot \ell = 370$ 을 有效한 간섭의 限界로 하여 使用한 探觸子의 中

心周波數로 370을 나눈 값을 測定限界的 膜두께로 하여 Fig. 7에서 점선으로 나타내었다. 대략 이 線을 境界로 하여 그 以下에서는 true thickness와 計算値는 어긋나기 시작하여 計算値는 어느 一定한 값으로 됨을 알 수 있다.

그러므로 이 限界値는 대체로 유효하다고 生覺되어진다. 그러나 Fig. 2에 있어서 精確한 유효한 간섭의 限界는 얼마로 정할 것인가 하는 問題는 多數의 data의 集積이 必要하기 때문에 今後의 果題라고 生覺되어진다.

干涉限界값인 $f \cdot l = 370$ 의 關係로 求한 理論的인 特定限界값과 一致함으로서 다른 探觸子의 경우에도 測定限界값을 推定할 수 있다.

2) 薄膜의 두께 l 이 入射한 超音波의 波長 λ 보다 매우 작은 경우 즉, 干涉이 일어나지 않는 두께 範圍에서는 MEM-Cepstrum解析에 依한 두께 測定이 不可能하였다.

앞으로 MEM-Cepstrum解析을 利用하여 精確한 두께 測定, 표층결합 등의 研究가 進行되어야 하겠다.

참고문헌

1. 金原 榮 著; 薄膜의 基本技術, 東京大學校 出版會, 1981.
2. 魚住清彦, 山口十六夫; 膜厚測定, 應用物理 第56卷 第6號, 1980.
3. 澁谷 昇; 眼科における超音波畫像, 眼科 Mook No. 25. 1985.
4. L. Paradis, Y. Serruys, R. Saglio; Ultrasonic signal processing for thickness measurements and detection of near-surface defects, Materials Evaluation/440/October, 1986, pp. 24~36.
5. 伊藤淳樹, 佐久間宣光, 小倉幸夫; 超音波를 用いた 頭蓋內壓變動檢出에 關する 基礎的 研究, 日本超音波醫學會誌, Vol. 14. No. 2, 1987, pp. 78~89.
6. 최경락; Maximum Entropy Power Spectrum을 이용한 구조물 특성 규명에 관한 연구, 한양대학교 대학원, 1987. 6월, 학위 논문 (석사).
7. 城戸健一; 音의 問題への アプローチ, 計測と制御, Vol. 19. No. 3 昭和 55年 3月, pp. 77~84.
8. 中山 淑; 超音波エコー의 分析, 表示 につりて의 2~3試み, 超音波醫學, Vol. 10, No. 4 1983, pp. 45~56.
9. 日野幹雄; 스펙트럴解析, 朝倉書店, 1977.
10. W. A. Simpson; A new technique to improve resolution for ultrasonic flaw

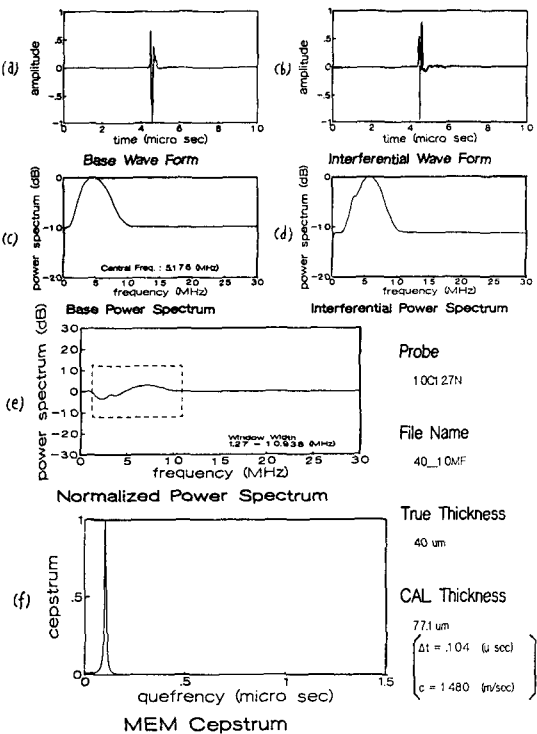


Fig. 9. Result of MEM-cepstrum analysis in case of probe 10 C12.7N, thickness $40\mu\text{m}$.

5. 結 論

MEM-Cepstrum解析에 依해 薄膜의 두께를 測定하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 薄膜으로 부터의 反射波를 MEM-Cepstrum解析함으로서 中心周波數 2.39MHz 探觸子의 경우는 約 $150\mu\text{m}$ 까지 中心周波數 5.17MHz 探觸子의 경우는 約 $80\mu\text{m}$ 까지 距離分解能 以下의 膜두께의 測定이 可能하였으며 이 結果는

- characterization in stainless steel welds, *Materials Evaluation*/44/July, 1986, pp.37~49.
11. 佐藤幸男 ; 信號處理入門, オーム社, 1986
 12. 城戸健一 ; デジタル信號處理入門, 丸善株式会社, 1985.