

《解 說》

## Acoustic Emission 技術의 商用原子爐에의 應用

金 台 秀

韓國에너지研究所

〈1983年 6月 13日 接受〉

### AE Application to Commercial Nuclear Power Plant

Tae - Soo Kim

Korea Advanced Energy Research Institute

#### 抄 錄

여러 産業에서의 AE의 利用技術中 特히 原子力發電所에서의 安全性檢査・監視에의 活用分野에 焦點을 두어 利用現況과 展望에 대해 記述하였으며, 아울러 關聯技術의 國內開發現況도 簡略하게 紹介하였다.

#### A B S T R A C T

AE technology developments directed at nuclear power plant application are reviewed and related activities in Korea are also briefly introduced.

#### 1. 序 論

1965년에 P.H.Hutton과 J.C.Spanner가 처음으로 Acoustic Emission法을 原子爐檢査에 適用할수 있는 可能性에 着眼하였으며, 그후 1968년에 始作하여 約6년에 걸쳐 實施된 EBOR實驗 (Experimental Beryllium Oxide Reactor)을 嚆矢로 本格的인 應用研究가 着手되었다.<sup>(1)</sup>

原子力分野에 AE를 利用하고자하는 目的은 大略 세가지로 區分할 수 있는데, 첫째로는 製作段階에서의 AE應用으로써 各種部品の 熔接部位에 대한 檢査 및 壓力容器의 水壓試驗을 통하여 惡性缺陷의 存在與否를 監視하고 他 NDT法으로 確認함으로써 事故를 豫防하고자 하는데 있다.<sup>(2)</sup>

둘째로는 原子爐稼動中 異常이 發生하였을때 AE를 使用하여 事故部位를 迅速히 標定하는것이며, 이 경우 稼動中止時間을 줄여 經濟性を 높일 수 있고 問題를 初期에 發見할수 있음으로써 效率를 增大시킬 수 있다. 1969년에 Dounreay發電所에서 2 - Channel AE裝備로써 他 NDT法으로는 數個月동안의 測定으로 發見하지 못하였던 leak를 찾아내는 最初의 成果를 올렸으며, 그후에도 1974년에 Picker-

ing 에 있는 CANDV 爐에서의 leak 를 發見하였다. 이러한 例에서 보는것처럼 稼動前檢査나 稼動中이더라도 一時原子爐를 停止시키는 定期檢査때에 利用하는 것은 技術的으로 큰 어려움이 없기때문에 널리 利用되고있는 實情이다. (1)

셋째의 目的은 原子爐正常稼動時에 On-line 으로 異常有無를 持續的으로 監視함으로써 安全性을 確保하고자 하는 것이다. 이 세번째 目的을 達成하는데는 많은 어려움이 隨伴되는데 첫째로 꼽을수 있는 問題는 騒音이다. 稼動中인 原子爐는 엄청난 크기의 各種 騒音을 恒時 放出하기 때문에, 이가운데서 어떻게 龜裂에서 發生하는 AE 信號를 選別·檢出해내느냐 하는 것이다. 뿐만아니라 測定資料의 分析에도 많은 研究가 必要한데, 이것은 다른 機構 (mechanism) 에서 同一한 AE 信號가 發生할때 判別하는 能力이 要求되기 때문이다. 이러한 雜音가운데서도 原子爐 1次系 冷却水內의 逸失物 즉 loose parts 등을 찾아내는데는 成功的이었으며 現在 많은 發電所에 設置되어 活用되고 있다. 그밖에 變換子의 耐高溫, 耐放射線 性能向上 등이 主要研究對象이 되고 있다. (3)

AE의 궁극적 目的은 on-line monitoring 을 通하여 惡性缺陷을 初期에 探知함으로써 事故를 未然에 防止하고, 아울러 위에 列學한 여러 機能을 包括的으로 가지는 것이므로, 原子爐의 全體的인 監視를 위해 各國에서 研究를 活發히 進行시키고 있다. 最近에는 騒音을 Fourier 變換하여 波長別로 分析한 後, 正常狀態의 것과 比較해 봄으로써 原子爐의 非正常狀態를 初期에 發見하는데 相當한 進展이 있었음이 밝혀지고 하였다. (4) 다음 章에 應用分野別로 좀더 仔細히 說明코져 한다.

## 2. 本 論

### (1) 稼動前 檢査時의 AE 應用

原子爐의 稼動前 壓力檢査 (Shop hydrotest 포함) 는 AE 應用의 主要한 領域이다. Spanner (Hanford Engineering Development Laboratory) (5) 의 조사에 의하면 1979년까지 原子爐에 대한 水壓試驗이 19차례가 있었는데 그중 제작된 장소에서 실시한 Shop hydrotest가 17건 이었고 설치후 시험한 것은 2건으로 보고 되었다. 뿐만아니라 1次系統에 대한 것이 18건이고 部品 및 pipe 에 관한 시험이 18건이나 된다. 조사 結果를 分析해보면 많은 AE發生源이 熔接部位에 있으며 이의 대부분은 原子爐의 健全성에 영향을 미치지 않았다. 또 하나의 主要한 AE 研究로 評價되고 있는 미국의 ORNL에서 HSST 實驗(6)(7)의 結果 Kelly(8)는 延性材質에서는 AE가 잘 發生하지 않는다는 Bentley(1) 등의 主張을 確認하였다. 즉 “熔接部分의 微細한 缺陷으로 부터의 AE 信號는 커다란 母體缺陷에서 發生하는 AE 信號보다 크다” 는 것이다. 따라서 대부분 熔接部位의 缺陷인 Slag inclusion이나 Porosity 또는 Unbonded Cladding의 結果로 빚어지는 것으로 判明되었으며 이 때는 RT 또는 UT를 使用하였다.

一例로 La Salle II 原子爐의 Shop hydrotest에서는 加壓實驗中에 AE와 UT의 關聯性을 조사하였다. AE의 發生源은 42個였고 UT로는 211개였으며 이들 모두가 우려할 만한 것이 못되었다. (9) 역시 대부분 熔接部位에서 發生하였는데 熔接線을 따라 나타나는 AE發生源은 缺陷이 미세해서 UT로는 測定이 不可能하였다. UT로는 發見되었으나 AE로는 測定되지 않은 것들도 있었는데 이것은 노즐 (nozzle) 領域에서 AE의 傳播가 遮斷되었거나 信號가 일그러졌기 때문이며, 다른 原子爐의 水壓實驗에서도 이와 類似한 結果가 報告되어 있다.

### (2) 稼動中 檢査時의 應用

一定期間 동안 運轉한 原子爐에 대한 AE檢査가 實施된 것이 6건 보고되었다. 보편적으로 動作壓力의 110% 以上 올리는 것이 바람직하다고 認定되고 있다. (5) 西獨의 Grundremningen에 있는 PWR의 試驗에서는 세 곳에서 AE가 發生하였고, 그 缺陷의 크기는 각각 50mm깊이 40cm깊이, 110mm깊이 20mm깊이, 100mm깊이 10mm의 길이의 缺陷들이었으며 이것들은 모두 稼動中에 發生한 것들이다. 왜냐하면 稼動前檢査時에는 아무런 異常이 없었기 때문이다. 또 하나의 容器에서는 缺陷의 징후가

seam weld를 따라서 나타났으며 이 부분은 다음 壓力試驗時 다시 測定되었다. 그 結果, 한 곳에서는 UT로 缺陷임이 判定되었으나 AE는 發生하지 않았으며 두번째의 곳에서는 전부 4개의 UT에 의한 缺陷정후가 AE로 다시 確認되었다. 이들 缺陷의 어느 것도 危險한 것은 아니었다.

### (3) 缺陷進展 連續監視 (on-line defect progress monitoring)

미국에 있는 Robinson II 原電에서 1971-1973 사이에 連續監視를 실시한 이래 많은 原子力 發電所에서 利用되고 있다. 이 on-line monitoring은 지속적이거나 또는 단속적으로 實施하기도 하며 현재의 技術水準으로는 制限된 領域에서만 실시되고 있다. 動作中인 原子爐와 雜音가운데서 AE가 選別·測定되려면 雜音의 크기가 어느 정도 이하라야 하든지 알아보기 위한 測定이 여러번 있었다. (1)

San Onofre 原電은 Westinghouse 社가 設計한 原子爐로써 3개의 loop을 가지고 있으며 出力은 430 MW인데, 最大出力時에 雜音은 주로 1次系統의 冷却水 循環裝置에서 發生하였고 그 Spectrum은 高周波 領域에서는 그 세기가 急激히 떨어지는데 100 KHz 以下の 낮은 周波數 領域에서는 AE信號보다 雜音이 훨씬 높으며 400 KHz 까지 감소하여 測定裝置의 回路雜音 水準으로 된다. (10) (11) 또한 높은 周波數 領域에서는 傳播의 감쇄가 심하므로(그림參照) Sensor의 位置가 龜製의 位置에 가까울 때는 龜製의 成長을 測定할 수 있다는 것을 알았다. 따라서 容器全體를 測定하기 위해서는 수 많은 Sensor 및 이에 該當하는 channel 數의 複雜한 裝備가 必要하므로 現實으로 不可能하다. (160 channel의 裝置가 1978년 현재 pipe의 corrosion을 測定하기 위해 建設中에 있으며 이것이 世界에서 제일 큰 것으로 알려지고 있다.) (12)

Pairie Island 原子爐는 出力이 530 MW로 두 loop를 가지고 있는데 試運轉段階와 最大出力時에 AE를 比較한 結果 background noise는 原子爐 outlet의 溫度 上昇에 따라 減少함을 보였다. 試運轉段階의 가장 낮은 noise level (용기바닥에서)이 100 mV였으며 最大出力을 낼 때는 500 mV (RMS)로 增加하였다. (3) Indian PWR (4-loop)의 測定結果는 多少 낮은 편이었지만 類似한 結果를 보였으며 그것은 循環 pump로부터 먼 거리에서 測定하였기 때문이라고 생각된다.

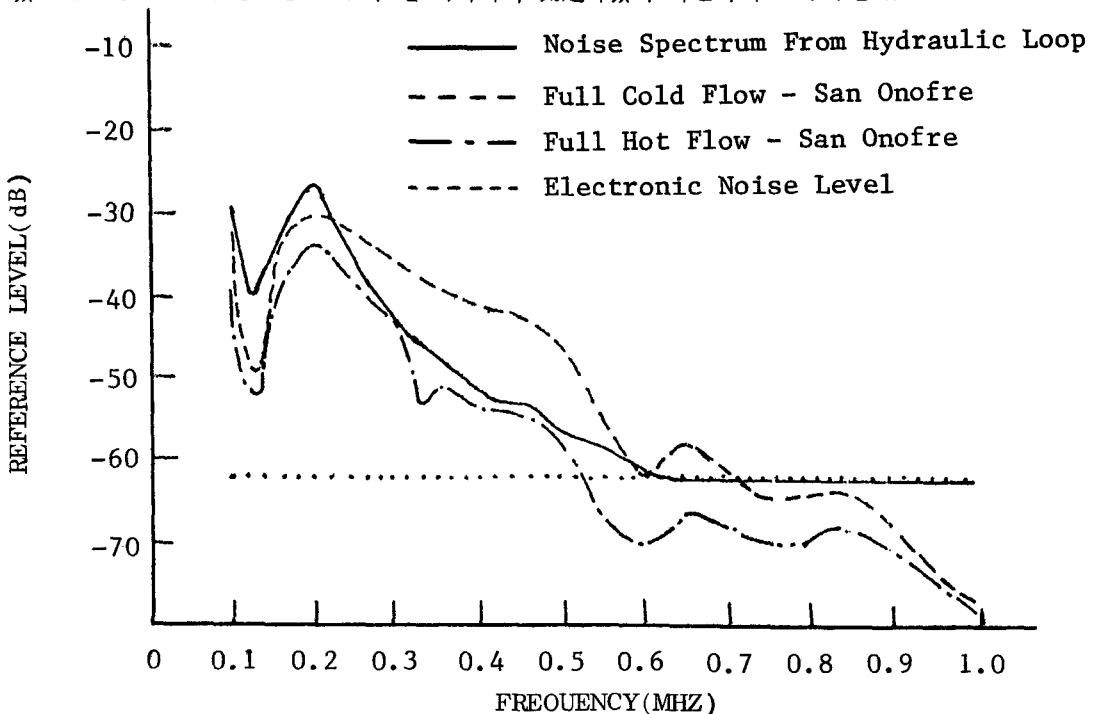


Fig 1. Background Noise Level

일찌기 EBOR計劃에 많은 기여를 한바있는 Westinghouse社의 Gopal 팀은 高溫에 動作하는 Sensor 開發, 位置標定에도 成果를 올렸으며, 많은 PWR原子爐에 대한 on-line monitoring을 한바 있고 그 중 두곳에서는 Sensor를 영구히 設徹하여 260℃에서 4년동안 成功的으로 動作한 예를 보고한 바 있다. 이러한 裝置로 leak는 確實히 測定할 수 있음을 立證하였으나 原子爐 全體의 健全性 評價에는 아직 미흡하여 더욱 研究가 必要하다고 생각된다.

#### (4) 漏水連續監視

龜裂로부터 冷却水가 새 경우 龜裂부근에서는 流體의 渦流가 생기고 이로 인하여 壓力이 變化하게 된다. 이러한 壓力變化는 構造物을 振動시키기 때문에 AE가 발생하게 되는 것이다. 이 때의 AE信號發生은 突發的인 것이 아니고 連續的인 것이다. 이러한 AE는 航空學에도 매우 중요하며 廣範圍하게 研究되고 있다. 예를 들어 AE진폭강도는 表面과 거칠기와 流體의 密度에 比例해서 增加한다.

이러한 冷却水의 流失로 發生하는 AE의 level은 background noise와 비교되었다. 容器全體 測定에 有利한 낮은 周波數에서는 測定possible한 流出量이 1 kg/s인 것으로 추정되나, 좁은 영역에서의 測定에 有利한 높은 周波數에서는 약 5 g/s 정도로 減度가 민감해진다.

Ciramitaro (13) 등은 pipe의 leak에서 AE反應을 定量化한바 있는데 같은 漏水率일지라도 crack에서 發生하는 AE는 圓形의 구멍에서 나는 AE보다 약 10배나 큰 AE를 發生함을 보였다.

현재의 기술 수준으로는 약 1.3g/s의 流水率을 測定할 수 있으며 1g/s이하의 減度까지 測定할 수 있는 裝置開發을 목표로 研究가 進行 중이다.(1)

#### (5) Loose parts monitoring

지난 數年동안 原子爐一次系統의 冷却水와 함께 들고 있는 loose parts 또는 異物質(原子爐 및 一次系統의 建設기간에 不注意로 들어간 것)이 1次系統構造物 또는 主要部品에 심각한 타격 및 損傷을 입힘으로써 原子爐를 稼動 中止해야 하는 경우를 많이 경험했다. 이러한 物體들은 spring 조각에서부터 熔接用具에 이르기까지 매우 多樣하다. 따라서 아무런 害를 끼치지 않을 때도 있으나 많은 경우에 있어서는 壓力境界面에 충격을 加하기도 하고 심지어 冷却水의 흐름을 遮斷하기도 한다.

AE 裝備를 設置함으로써 (1) Shutdown 등의 事故發生을 豫測할 수 있고 (2) “深刻한 程度”에 대한 資料를 얻을 수 있는 기능을 가진다. 이 경우의 AE變換子は 低周波數(0-50 KHz) 特性을 가지는 것을 사용하며 4-10 KHz의 band pass filter 로써 感度를 높인다. (14) 이 分野는 比較的 쉽게 定量的인 데까지 研究가 되었으며 Millston II 原子力發電所를 효시로 널리 이용되었고, 현재의 技術水準으로는 이 AE가 가장 信賴性있는 loos part 측정기술로 인정되고 있다. U.S.NRC(U.S. Nuclear Regulatory Commission)은 1978.1.1부터 미국내 모든 原子力發電所에 AE 裝備를 設置하여 loose parts를 測定할 것을 규정하고 있다. (15)

### 3. 國內 研究 現況

最近 수년동안 國內에서도 AE에 관한 관심이 고조되어 현재 몇몇 出捐研究所 및 大學에서 여러 기종의 AE 裝備를 導入하여 基礎實驗과 應用實驗을 實施하고 있다.

韓國에너지研究所에서는 AET 201(Single channel) 및 AET 5000(4 channel)을 保有하여 標定實驗 및 基礎實驗을 하고 있으며 年次計劃에 의하여 壓力容器實驗을 거쳐 發電爐에의 應用을 目標로 하고 있다. (16) 또한 韓國科學技術院은 AET 5000(2 channel)으로 AE의 Mechanism에 중점을 둔 基礎研究를 韓國標準研究所는 AET 5000(4 channel)를, 韓國機械研究所는 AET 4908(10 channel)의 대형 裝備, 機械研究所 大德分所에서는 Dunegan/Endevco 3000(2 channel), 國民大學은 NF(2 channel)을 각각 가지고 있으며 基礎實驗, 金屬材料實驗, 破壞力學을 위한 實驗을 遂行中에 있고, 最近 여러 企業研究所에서도 AE 裝備導入을 추진중에 있다고 傳聞된다.

#### 4. 結 論

原子爐의 水壓 test를 통하여 AE應用은 PSI 및 ISI分野에서 많은 成果를 얻었다. 뿐만아니라 leak 및 loose part 監視에서는 다른 方法으로는 불가능한 것을 AE를 써서 훌륭한 結果를 얻을 수 있음을 보여주었다. 그러나 現在의 技術水準으로는 AE의 最終目標인 正常稼動時의 龜裂成長 測定을 통한 原子爐의 監視는 部分的으로만 可能하다. 즉 局部的인 領域에서만 가능하며 전체 감시는 미흡하여 아직도 지속적인 研究開發이 要求되고 있다. (17) (18) (19)

지금까지의 研究動向은 주로 1次系統의 健全性監視에 두었지만 터빈의 監視등 2次系統에의 適用도 연구되고 있다. steam turbine의 回轉子에 발생하는 龜裂의 成長 및 날개의 접촉 및 마찰, 정상위치에서의 離脫여부, bearing의 상태, 潤滑油의 汚染등도 診斷하는데 유용하다. (20) 最近에는 TMI-2 原子爐 事故이후 valve를 通過하는 steam 때문에 발생하는 AE를 檢査함으로써 relief valve의 位置를 探知하는 研究가 進行되고 있다. (21)

아울러 AE에 대한 많은 基礎研究 (22)가 꾸준히 遂行되고 있는데 여러가지 材料에 대한 AE發生 Mechanism, (23)(24)(25) 塑性領域의 成長에 따른 AE의 定量的인 研究, (26)(27)(28) 振幅 分布 (47) 등에 커다란 進展을 보이고 있어 AE技術의 發電用原子爐에의 利用의 展望은 매우 고무적이라 생각한다.

### 參 考 文 獻

- 1) A.A. Pollock, "Progress in Acoustic Emission Monitoring of Nuclear Plant", Technical Report, DE 78-2 (1978).
- 2) Ho Chul Kim, "s-1=1 Stress Corosion Cracking -1 On-line monitoring", KAERI Report (1979).
- 3) R.G. Bentley, "A Review of Acoustic Emission for Pressurized Water Reactor Applications", NDT International, p. 319 (Dec. 1981).
- 4) A. Tauabe et al., "Nuclear Power Plant Diagnostic System Using Noise Analysis," Toshiba Rev., International Ed., No. 137, 13 (1982).
- 5) J.C. Spanner, "Acoustic Emission-Some Examples of Increasing Industrial Maturity," Acoustic Emission Monitoring of Pressurized systems, ASTM STP 697, (1979).
- 6) D.J. Naus, "Acoustic Emission Monitoring of Intermediate Pressure Vessels Tested Under ORNL Heavy Steel Technology Program," Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems, ASTM STP 697, (1979).
- 7) P.H. Hutton, et al., "Acoustic Emission Measurements: HSST V-7B Intermediate Vessel Test," Acoustic Emission Monitoring of Pressurized System, ASTM STP 697, (1979).
- 8) M.P. Kelly, "Acoustic Emission Monitoring of Vessel V-9," ORNL-TM-4805, Vol. II (1975).
- 9) J.P. Clark and R. Witek, "Acoustic Emission Monitoring and Ultrasonic Examination Correlation on a Reactor Pressure Vessel," EPRI-NP-921 (Oct. 1978).
- 10) P.H. Hutton, et al., "Acoustic Emission and Estimation of Flaw Significance in Reactor Pressure Boundary," PNL-SA-10396, Pacific Northwest Laboratory.
- 11) P.H. Hutton, "Development of an Acoustic Emission Zone Monitor and Recorder for BWR Pipe-Cracking Detection, EPRI-NP-1408, (May 1980).

- 12) M. Arrington," Some Industrial Applications of Acoustic Emission Monitoring," *NDT International* 107 (June 1978).
- 13) W. Ciramitaro et al," Primary Coolant Acoustic Leak Detection System Development," WCAP-9239, Westinghouse Nuclear Energy Systems, (Dec. 1977).
- 14) Southwest Research Institute Brochure," Loose-Parts Detection in Nuclear Reactor Coolant Systems".
- 15) U.S. NRC," Loose-Parts Detection Program for the Primary System of Light-Water-Cooled Reactors," Regulatory Guide 1, 133, (May 1981).
- 16)
- 17) A. Tanabe et al," Nuclear Power Plant Diagnostic System Using Noise Analysis," *Toshiba Review*, No. 137, (Jan-Feb. 1982).
- 18) P.H. Hutton, R.J. Kurtz," Acoustic Emission-Flaw Relationship for Inservice Monitoring of Nuclear Reactor Pressure Boundaries," PNL-SA-9977, Pacific Northwest Laboratory (Oct. 1981).
- 19) P.H. Hutton, et al," Acoustic Emission for Continuous Surveillance of Various Commercial Structures," Pacific Northwest Laboratory, (March 1982).
- 20) L.J. Graham et al," Acoustic Emission Monitoring of Steam Turbines," EPRI-CS-2367, (April 1982).
- 21) W.F. Hartman," Acoustic Monitoring of Relief Valve Position," EPRI NP-1313, Electric Power Research Institute, (Feb. 1980).
- 22) D.E.W. Stone and P.F. Dingwall," Acoustic Emission Parameters and their Interpretation," *NDT International*, 51 (Apr. 1977).
- 23) S.Y.S. Hsu and K. Ono," Acoustic Emission Behavior of Nickel During Tensile Deformation," *Progress in A/E Proceedings of the 6th International A/E Symposium, Japan*, (Oct. 1982).
- 24) S. Yuyama," Acoustic Emission During Environmental Cracking of High Strength Titanium Alloy," *Progress in A/E Proceedings of the 6th International A/E Symposium, Japan*, (Oct. 1982).
- 25) J. Holt et al," Methods of Measurement and Assessment of the Acoustic Emission Activity from the Deformation of low alloy steels," *NDT International*, 49 (April 1981).
- 26) A.A. Pollock," Quantitative Evaluation of Acoustic Emission from Plastic Zone Growth," *International Advances in Nondestructive Testing*, Vol. 6, p. 239 (1979).
- 27) D.G. Eitzen et al," Fundamental Developments for Quantitative Acoustic Emission Measurements," EPRI-NP-2089, (Oct. 1981).
- 28) J.R. Quinn," Summary of Fundamental Developments for Quantitative Acoustic Emission Measurements," EPRI-NP-1877, Electric Power Research Institute, (June 1981).
- 29) A.A. Pollock," Acoustic Emission Amplitude Distribution," *International Advances in Nondestructive Testing*, Vol. 7, 215 (1981).