

<解 說>

可變荷重을 받는 構造物의 疲勞 解析 및 試驗

이 장 무*

1. 머 리 말

機械 및 構造物들이 等振幅荷重만을 받는 경우는 극히 드물어서 大部分이 振幅과 周波數가 不規則하게 變하는 荷重을 받는다. 實荷重履歷(service load history)의 代表的인 例가 그림 1에 圖示되어 있다. 實荷重履歷이 不規則(random)한 모양을 갖는 것은 飛行機, 自動車, 船舶 등의 많은 構造物들이 空氣의 터블런스, 거친 道路表面 및 大洋의 波濤와 같이 random한 主위環境에 接하기 때문이다(ref. 1). 이 random한 環境과 構造物의 彈塑性質들로 因해서 構造物로부터 測定된 荷重應答信號들(應伸率, 變位 혹은 加速度)은 振幅과 周波數가 random하게 變하는 特定한 形態의 波形을 갖는다(refs 2,3). 現今 우리나라에 이 方面의 研究가 活潑하지 못하여 complex load history가 疲勞에 미치는 影響과 이에 聯關된 疲勞試驗들을 簡略히 紹介한다.

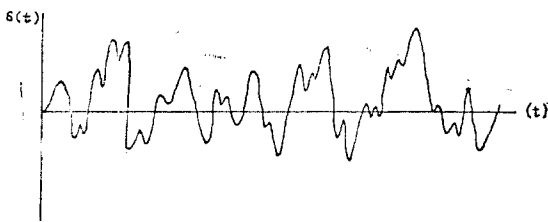


Fig. 1. Service load history

2. 振幅 및 周波數 變化의 影響

2.1 周波數의 影響

大部分의 金屬들은 室溫에서 疲勞試驗의 周波數가

200 cycles/min.에서 10,000 cycles/min.의 範圍에 있으면 周波數의 疲勞에 對한 影響은 無視할 수 있다.

그러나 室溫에서 creep을 하는 납과 같은 低溶解點을 갖는 金屬들은 高溫에 있는 다른 金屬들과 같이 周波數의 影響을 많이 받는다. 一般의으로 試驗周波數가 減少하면 疲勞強度도 다소 減少하며 이는 다음 事實에 起因한다. 첫째 疲勞強度는 應力의 한 cycle當 일어나는 塑性變形과 聯關지을 수 있는데 높은 周波數에서는 이 變形이 일어날 時間이 充分히 없기 때문에 疲勞損傷이 적다. 둘째는 corrosive한 環境下에선 疲勞強度가 減少하는데 낮은 周波數에선 이 影響이 더욱 크기 때문이다. 한편 高溫에서의 疲勞와 thermal fatigue에 있어 周波數의 影響은 대단히 크다(refs 5,6). plastic들은 高減衰 및 低熱傳導性質들을 갖고 있어 溫度上昇이 周波數와 應力의 크기에 따라 甚히 影響을 받는다. 結果的으로 周波數와 應力의 程度에 따라 溫度가 계속 올라가서 crack 傳播期間이 없이 thermal softening에 의한 failure가 일어나는 수가 많다. 高溫하의 金屬의 疲勞는 溫度가 增加하면 周波數의 影響이 점점 커져서 failure는 total cycle들 보다는 total time에 더 關係가 있게 된다. 이는 低溫下에선 應力이 加해지자 곧 變形이 이루어지나 高溫하에선 變形이 계속 일어나기 때문이다

2.2 振幅의 變化의 影響

振幅의 影響은 low cycle fatigue와 high cycle fatigue에 있어서 다소 다르다. low cycle fatigue에 서는 構造物의 非彈塑性質의 記憶效果(혹은 hysteresis-loop) 때문에 load-time history가 대단히 重要하나 high cycle fatigue에서는 荷重履歷의 統計, 即 荷重 振幅의 統計分布가 보다 더 重要한 意義를 갖는다.

* 正會員, 서울大學校 工科大學 機機工學科

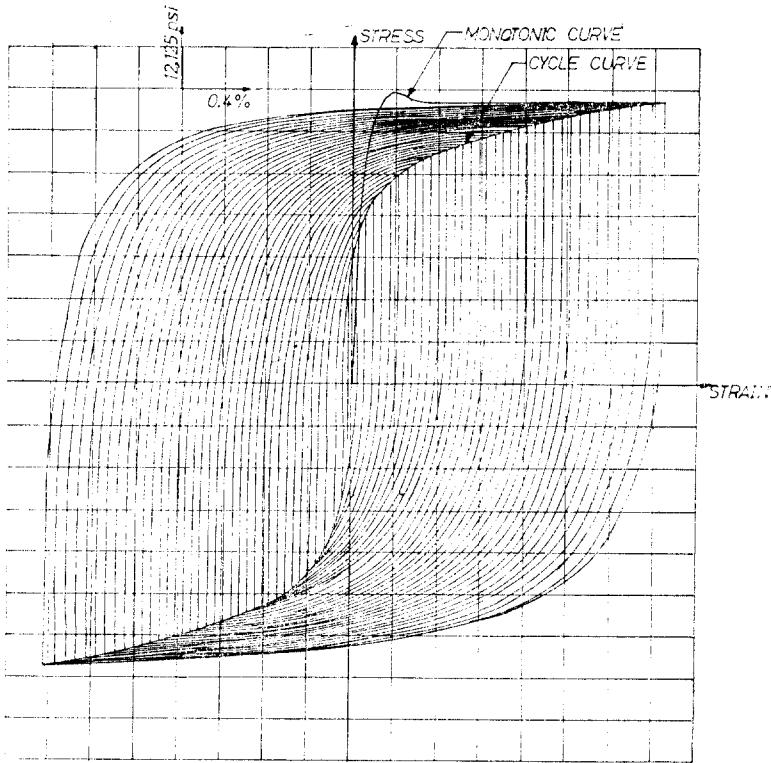


Fig. 2. Hysteretic loops for SAE 1008 steel

그림 2의 hysteresis loop 들은 SAE 1008 steel 로 된 낫치가 없는 試片의 非彈性 cyclic 應力-應伸率關係를 보여주고 있다. 첫째로 stable cyclic 應力-應伸率曲線이 static 應力-應伸率曲線과 다른 것을 注目할 수 있는데 그림 2는 軟化材料(即 constant strain range controlled test 에 있어서 軟化는 stress range 의 減少를 隨伴한다.)의 代表的 特性을 나타낸다. stable hysteresis loop 들의 꼭지점들을 지나는 曲線은 다음과 같이 表示된다(ref. 7).

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (1)$$

여기서 $\Delta \epsilon$ 은 全應伸率幅, $\Delta \sigma$ 는 應力幅, E 는 彈性係數, K' 은 cyclic strength 의 係數이며 n' 은 cyclic 應伸率硬化係數이다. 硬化와 軟化를 再現시키는데 必要한 loop 모양의 變化는 (1)式에 n' 과 K' 을 通해서 導入된다. 過渡값으로는 n^* 과 K^* 를 使用하며 硬化, 軟化現象 및 平均應力의 relaxation 에 대한 仔細한 內容은 參考문헌을 參照할 수 있다. 위의 方法에 依해 應力履歷

으로부터 應伸率履歷을 혹은 그 反對를 求할 수 있으며 많은 疲勞損傷累積法則이 두 履歷을 同時에 必要로 한다. 이 hysteresis loop approach 에 의하여 prestrain 의 影響과 sequence 의 影響에 對한 興味로운 面이 參考문헌 7과 8에 說明되어 있다. 參考문헌 8에는 mean stress 의 影響과 overload 의 影響도 說明되어 있다. Probst 와 Hillberry (ref. 9)에 의해서 single peak tensile overload(即 fatigul delay 와 arrest)에 依한 有益한 影響이 報告되었는데 이에 對한 說明으로는 세 가지 有名한 理論들(crack blunting, theory of residual compressive stresses 와 rack closure theory)이 있다.

非彈性荷重에 對한 또 하나의 重要한 部分은 낫치 底部의 局地的 非彈性 應力-應伸率性質(local inelastic stress-strain behavior)이다. 局地的 履歷은 正格(nominal) 應力-應伸率로부터 Neuber 의 式(ref. 10)을 利用해서 求할 수 있다. 이 式에 依하면 理論的 應力集中係數는 實際的 應力 및 應伸率-集中係數의 幾何平均

과 같다.

$$K_f = [(\Delta\sigma/\Delta s)(\Delta\epsilon/\Delta e)]^{1/2} \quad (2)$$

$$K_f(\Delta S\Delta eE)^{1/2} = (\Delta\sigma\Delta eE)^{1/2} \quad (3)$$

만약 正格應力 및 應伸率在 彈性限界內에 局限된다면 (即 $\Delta eE = \Delta S$),

$$K_f S = (\Delta\sigma\Delta eE)^{1/2} \quad (4)$$

로 表示된다. 一般적으로 작고 날카로운 notch는 疲勞에 있어서 K_f 에 의해 表示되는 것 보다 덜 影響을 미치므로 上記式들을 疲勞에 利用할 때에는 K_f 대신 K_T (疲勞集中係數)를 使用한다. 따라서 notch 試片의 $K_f(\Delta S\Delta eE)^{1/2}$ 이 非notch 試片의 $(\Delta\sigma\Delta e)^{1/2}$ 과 같으면 두 試片은 같은 壽命에서 detectable crack을 形成하게 될 을 알 수 있다. 非notch 試片의 疲勞壽命으로부터 여러 가지 notch의 試片들이 疲勞壽命을 計算하는 詳細한 節次는 參考文獻 8과 10에서 볼 수 있다.

high cycle fatigue에 있어서 荷重振幅의 影響이 振幅의 統計的 分布에 依하여 研究 說明되고 있으므로 첫째로 알아야 될 일은 荷重履歷을 統計的으로 어떻게 解析하는가 인데 이를 爲하여 여러가지 cyclic counting 方法들(ref. 11)이 提案되었다. 이들中 peak count 方法과 range-mean 方法이 흔히 쓰인다. 荷重의 順序效果(sequence effect)를 疲勞累積計算에 反映할 수 있도록 rain-flow counting 方法(ref. 8) 등이 最近에 提案되어 現在 美國 產業界와 研究所에서 널리 쓰이고 있다

3. 可變振幅 疲勞試驗

可變振幅이 high cycle fatigue에 미치는 影響은 可變振幅 疲勞試驗, 혹은 random fatigue testing과 깊은 關係가 있으므로 通常 같이 論議된다. 다음에 거의 모든 可變振幅 疲勞試驗이 소개된다. prototype 疲勞試驗은 이미 잘 알려져 있으므로 本解説에서는 除外된다. 實際의 service condition을 simulate하기 위한 實驗室疲勞試驗(laboratory fatigue test)은 크게 programmed load tests와 random load tests로 分類될 수 있다.

3.1 프로그램 疲勞試驗

可變荷重 spectrum의 代表的 例가 그림 1에 圖示되었는데 프로그램 疲勞試驗(programmed fatigue test)은 이 荷重 spectrum全體를 比較的 짧은 期間동안의 等振幅試驗들로 이루어진 筒簡의 덩어리(block)로 分割하여 行한다. 自動車의 例를 들면 車의 必要한 部分들

에 스트레인 게이지나 가속도계등을 附屬시켜 이로부터 나오는 시그날을 記錄裝置에 貯藏시키는데 一律的으로全體를 한번에 記錄하지 않고 미리 選擇된 道路區間들 各各에 對해 記錄한다. 이 記錄들은 各各 緊急停車, 혹은 人道를 받는 등의 特定한 境遇(special events)들을 包含해야 된다. 後에 이 筒簡의 記錄들을 適當한 比率로 섞어서 全體 荷重履歷을 만든다. 그림 3에 任意의 順序를 갖는 等振幅 프로그램 疲勞試片의 例가 圖示되어 있다.

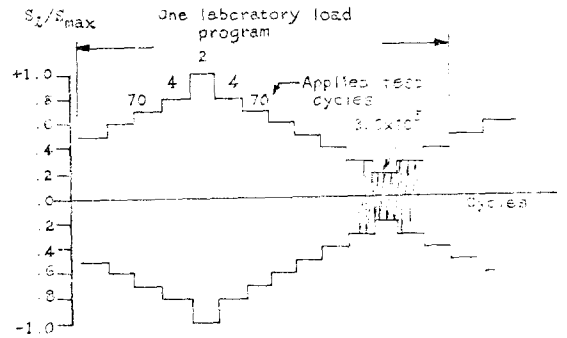


Fig. 3 A programmed constant amplitude load arbitrary sequence

여기서 한가지 注目할 것은 위의 荷重프로그램이 順序(sequence), 荷重水準의 숫자(number of levels), block의 size 등의 因子가 材料의 疲勞壽命에 미치는 影響을 考慮하고 있지 않다는 것이다. Lo-Hi, Hi-Lo, Lo-Hi-Lo 및 random sequence 중 어느것이 더 疲勞損傷을 주는가는 境遇에 따라 다소 다르지만 最少限 順序가 疲勞壽命에 깊은 影響을 준다는 것은 널리 證明되었다. 또한 block size를 減少시키고 block의 個數를 充分히 늘이면 順序의 影響이 크게 減少하는 것도 알려져 있다. 한가지 더 特記할 것은 荷重의 水準의 숫자를 變更시키면 荷重 各水準의 크기는 물론 이 水準에서의 相對頻度(relative frequency of occurrence)도 變하게 된다는 것이다. 一般적으로 높은 水準의 應力은 材料에 殘留應力을 導入시키기 때문에 荷重水準의 숫자는 殘留應力에 나아가서 疲勞壽命에 影響을 미치게 된다. 이러한 制限들을 克服하기 爲하여 block의 숫자를 增加시키고 그림 4에 보인 것과 같이 random 숫자 통계표에 依해 荷重들을 random sequence로 나열하는 方法이 提案되었는데 이는 RPCA test라 부른다.

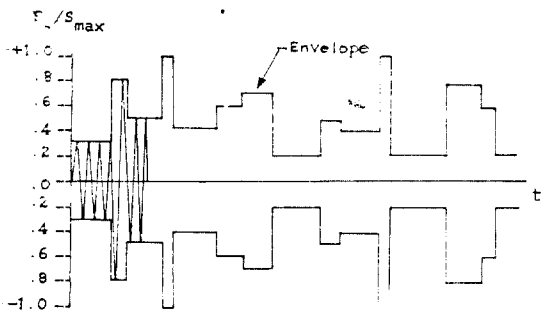


Fig. 4 A random programmed constant amplitude load (RPCA)

上記의 試驗方法들은 荷重의 統計分布가 平均荷重에 대하여 對稱인 境遇는 問題가 없으나 非對稱인 境遇에는 適用이 困難하며 荷重의 樣相도 實荷重履歷도 多少 距離가 있으므로 그림 5에서 볼 수 있는 ICR test 라는 것이 最近 提案되어 널리 使用되고 있다. 이 方法에서는 連續的인 荷重스펙트럼이 不連續的인 荷重스펙트럼으로 變換되며 個個의 荷重 사이클들에 컴퓨터에서 計算된 random number 에 依해 符號를 붙이고 이로부터 各各의 사이클을 random sequence 로 불러낸다. 이 때에 荷重의 水準들은 미리 定해진 불연속숫자(discrete number)에 固定되며 여러 水準의 荷重들에 대한 相對 頻도가 實荷重履歷의 그것과 같도록 適當한 方法이 취해진다. 같은 荷重分布에 對해 ICR test 가 위의 方法들 中 가장 損傷累積을 크게 한다는 것이 알려져 있다.

3.2 랜덤荷重疲勞試驗

프로그램 疲勞試驗에서는 各 水準의 荷重들을 digital random sequence 에 依해 불러 냈는데 이들과 random test 혹은 analogous random test (ARP) 의 그것들과 比較할 必要가 있다. Digital random sequence 는 어떤 相關性(correlation)이 없이 誘導되네 反하여 ARP test (實荷重履歷에 매우 近似한)에서는 random 한 荷重의 周圍環境에 接한 構造物의 彈性性質(電氣 濾터에 依한 샘플레이프되는)때문에 어떤 相關 (power spectral density 幅과 irregularity ratio 에 依해 表示되는) 이 存在한다. 最近의 研究들에 依하면 相關이 크면 클 수록 疲勞壽命이 더 短縮된다는 것이 알려져 있다. ARP test 는 stationary radom process (SRP) test 와 programmed random process (PRP) test 로 더욱 分

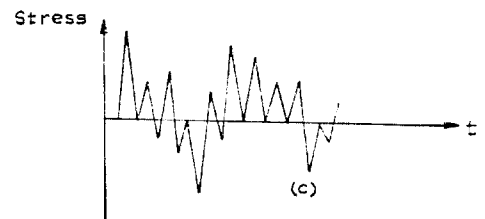
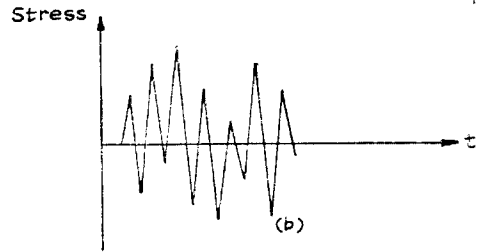
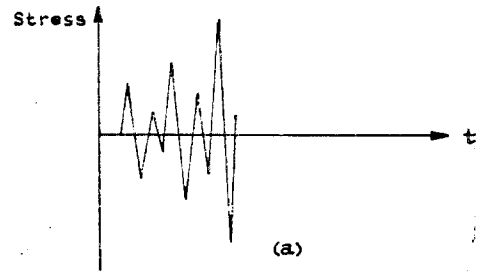


Fig. 5 Three random loading programs: (a) random cycle, (b) random half cycle restrained, (c) random half cycle unrestrained

類될 수 있으며 ARP test 를 理解하기 爲해선 random vibration 理論에 對한 약간의 知識이 必要하다.

SRP 疲勞試驗에 있어선 試片들이 固定된 RMS 수준에서 SRP 荷重을 받으면서 破壞時까지 試驗된다. 그림 6에 SRP 荷重履歷과 그의 power spectral density 가 圖示되어 있는데 SRP 疲勞試驗을 適用하기 爲해선 實荷重 스펙트럼이 staitonary Gaussian임을 確認하고 irregularity ratio 를 正確히 샘플레이프 해야 된다. ARP 疲勞試驗이 프로그램 疲勞試驗에 비해 越等히 實荷重에 恰似한 荷重을 利用하고 疲勞損傷累積도 比較의 크지만 아직도 非對稱荷重履歷等에는 適用하기 어렵다. 最近 많은 研究에 依하면 壽命이 길게 設計된 大部分의 構造物들은 實際로 quasi-stationary random process (QSRP)의 荷重履歷을 받는다라는 것이 알려져졌는데 QSRP 에서는 RMS 水準(혹은 荷重의 intensity)과 平均荷重

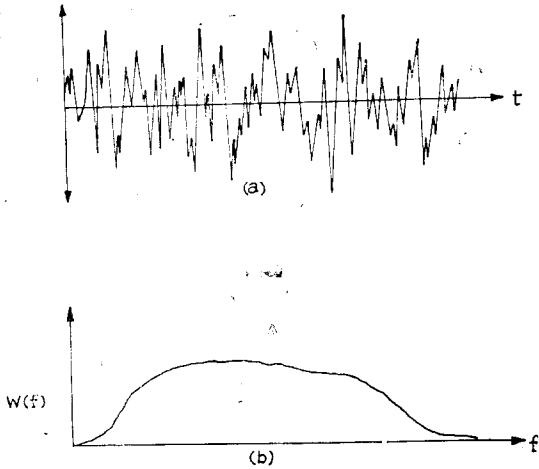


Fig. 6 Stationary random process (a) time history of sample function, (b) spectral density.

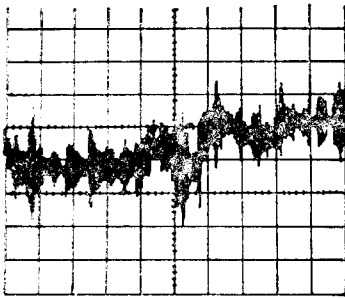


Fig. 7 QSRP load history

이 시간에 따라 緩慢하게 變한다. 이 아이디어에 依해 PRP 疲勞試驗(ref. 23,24)이 提案되었는데 이 試驗에서는 試片이 各各 다른 RMS intensity 와 平均荷重을 갖는 個個의 SRP 荷重들로 構成된 複合的인 荷重履歷을 겪게 되며 疲勞試驗時 重要한 意味를 갖는 最大荷重의 頻度가 正確히 反映된다. 現在 알려져 있는 疲勞試驗方法들 中 가장 精巧한 方法이며 PRP 荷重의 代表的인 例가 그림 7에 圖示되어 있다. 이 方法의 使用을 爲해서는 analogue circuits, function generator, paper tape reader, mini-computer, statistical analyzer, MTS-type fatigue testing unit 등이 必要한데 最近 韓國 各處의 研究 機關 및 學校에 優秀한 器材들이 導入되어 이 形態의 試驗이 不遠間 이루어질 수

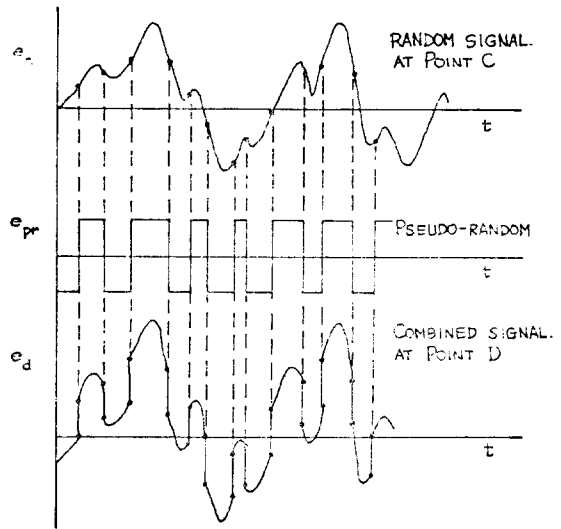


Fig. 8 Accelerated fatigue testing signal

있다고 생각된다. 끝으로 損傷累積의 理論의 推定, 적은 振幅의 荷重들을 疲勞壽命에 影響을 주지 않고 testing signal에서 効果의으 除去시켜 疲勞試驗時間을 短縮시키려는 accelerated fatigue testing(그림 8참조)에 對한 研究들이 活潑한 것을 指摘할 수 있다.

References

Nature of service load histories:

1. Akaike, H. and Swanson, S. R., "Load History effects in Structural Fatigue." Proceedings of the Annual Meeting, Institute of Environmental Sciences, Anaheim, California, April 1969.
2. Crandall, S.H. and Mark, W.D., "Random Vibration in Mechanical Systems." New York: Academic Press, 1968.
3. Jaeckel, H. R. and Swanson, S. R., "Predicting Service Life of Automotive Parts Calls for Random Load Test." SAE Journal, 77:42-47, November 1969.

Frequency effects:

4. Forrest, P.G., **Fatigue of Metals.** Oxford: Pergamon Press, 1962.
5. Crawford, R.J. and Benham, P.P., "Fatigue and Creep Rupture of an Acetal Copolymer."

- Journal Mechanical Engineering Science, 16 (3): 178, 1974.
6. Coffin, Jr., L. F., "Fatigue at High Temperature-Prediction and interpretation." James Clayton Lecture, Proc. Instn. Mech. Engrs., 188:109, September 1974.
 - Effect of change in amplitude (low cycle fatigue):**
 7. Martin, J. F., Topper, T. H., and Sinclair, G. M., "Computer Based Simulation of Cycles Stress-Strain Behavior with Applications to Fatigue." Material Research and Standard, MTRSA, 11:23-50, February 1971.
 8. Dowling, N. E., "Fatigue Failure Predictions for Complicated Stress-Strain Histories." Journal of Materials, JMLSA, 7:71-87, March 1972.
 9. Probst, E. P. and Hillberry, B. M., "Fatigue Crack Delay and Arrest Due to Single Peak Tensile Overloads." AIAA Journal, 12:330-335, March 1974.
 10. Morrow, JoDean, Wetzel, R. M., and Topper, T. H., "Laboratory Simulation of Structural Fatigue Behavior." Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life, ASTM STP 462, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 93-104, 1970.
 - Variable amplitude effects in high cycle fatigue and random fatigue testing:**
 11. Ravishankar, T. J., "Simulation of Random Load Fatigue in Laboratory Testing." Institute for Aerospace Studies, University of Toronto, U-TIAS Review No. 29, March 1970.
 12. Swanson, S. R., "Random Load Fatigue Testing-A State of the Art Survey." Material Research and Standards, 8:11-44, April 1968.
 13. Tedford, J. D. and Crossland B., "Block-Program Fatigue Testing of Automobile Wheel Spindles." Proc. Instn. Mech. Engrs., 187: 296-299, 1973.
 14. Naumann, E. C., "Evaluation of the Influence of Load Randomization and of Ground- Air-Ground Cycles on Fatigue Life." NASA TN D-1584, October 1964.
 15. Payne, A. O. "Random and Programed Load Sequence Fatigue Tests on 24 ST Aluminum Alloy Wings." ARL/SH 244, September 1956.
 16. Thakkar, R. B., "Exact Sinusoidal Simulation of Fatigue under Gaussian Narrow Band Random Loading." Ph. D. Thesis Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, 1972.
 17. Graham, J. A., Millan, J. F., and Appl. F. J., editors, "Fatigue Design Handbook." New York: Society of Automotive Engineers, Inc., 1963.
 18. Brown, G. W. and Ikegami, R., "The Fatigue of Aluminum Alloys Subjected to Random Loading." Experimental Mechanics, 10:321-327, August 1970.
 19. Bussa, S. L., Sheth, N. J., and Swanson, S. R., "Development of a Random Load Life Prediction Model." Materials Research and Standards, MTRSA, 12:31-43, March 1972.
 20. Dodds, C. J., "The Laboratory Simulation of Vehicle Service Stress." Journal of Engineering for Industry, Transactions of ASME, 96: 391-398, May 1974.
 21. Hollinger, D, and Mueller, A., "Accelerated Fatigue-Testing Improvements-from Road to Laboratory." SAE Transaction Paper No. 730564, pp. 1920-1929, 1973.
 22. Linsley, R. C. and Hillberry, B. M., "Random Fatigue of 2024-T3 Aluminum under Two Spectra with Identical Peak-Probability Density Functions." Probabilistic Aspects of Fatigue, ASTM STP 511, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 156-167, 1972.
 23. Lee, J. M. and McCennell, K. G. "Random Load Simulation in Laboratory Fatigue Testing, Part I: Theoretical Analysis." Engineering Research Institute, I. S. U., ERI-76267, 1976.
 24. McConnell, K. G. and Lee, J. M., "Random Load Simulation in Laboratory Fatigue Testing, Part II: Experimental Verification." Engineer

- ing Research Institute, I. S. U., ERI-76268, 1976.
25. Nelson, D. V. and Fuchs, H. O., "Predictions of Cumulative Fatigue Damage Using Condensed Load Histories." Paper No. 750045 presented at SAE Automotive Engineering Congress and Exposition, February, 1975.
-