

DINAMICA DE PUENTES LIQUIDOS

J. Meseguer, J.M. Perales

Lamf/ETSIA, Laboratorio de Aerodinámica, ETSI Aeronáuticos,
Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

En estas páginas se presentan los resultados obtenidos en el experimento LICOR (Liquid Column Resonances) realizado a bordo del Spacelab durante la misión SL-D2 en abril de 1993. Aunque el análisis del experimento (la respuesta a oscilaciones forzadas de un puente líquido) aún no ha finalizado, los resultados preliminares indican que los resultados experimentales están en concordancia con las predicciones teóricas, tanto cualitativa como cuantitativamente.

INTRODUCCION

Se conoce con el nombre de puente líquido a la configuración fluida formada por una columna isoterma de líquido, de volumen V , mantenida por las fuerzas de tensión superficial entre dos discos sólidos, en nuestro caso ambos de igual radio, R , coaxiales y paralelos entre sí, y separados una distancia L . El líquido de trabajo se caracteriza por su densidad, ρ , la tensión superficial de la interfase con el medio circundante, σ , y su viscosidad cinemática, ν (se supondrá que dichas características del fluido son constantes), y el estímulo aplicado, la oscilación de uno de los discos soporte en el experimento que se describe a continuación, por la amplitud de la oscilación, A , y su frecuencia, f .

El experimento "Liquid Column Resonances" (LICOR), realizado durante la misión Spacelab-D2, fue el resultado de una propuesta de experimentación sobre dinámica de puentes líquidos aceptada por la Agencia Europea del Espacio (ESA) para dicha misión, avalada por científicos del Battelle Institut e.V. de Frankfurt, la Universität der Bundeswehr de Munich y de la Universidad Politécnica de Madrid (Laboratorio de Aerodinámica, E.T.S.I. Aeronáuticos, Lamf/ETSIA).

La finalidad del experimento era el estudio de la respuesta forzada de columnas líquidas esbeltas frente a oscilaciones armónicas de uno de los discos soporte. Para ello se utilizó el Módulo de Física de Fluidos (FPM, Fluid Physics Module), uno de los equipos multiusuario propiedad de la ESA, que ésta pone a disposición de la comunidad de científicos para la realización de experiencias con fluidos en microgravedad en los vuelos del Spacelab. El FPM es, a grandes rasgos, un instrumento con una cámara de ensayos en la que se pueden formar puentes líquidos entre dos discos sólidos, uno de los discos sirve para la inyección/succión de líquido (mediate un orificio conectado a una jeringa incorporada en el equipo) y se puede desplazar axialmente, tal como se esquematiza en la Figura 1, mientras

que el otro admite desplazamientos laterales y vibración axial; ambos discos pueden girar independientemente dentro de un amplio margen de velocidades de giro. El FPM lleva incorporada una cámara de vídeo CCD que permite observar desde tierra la evolución de la configuración fluida y registrar las imágenes para su análisis posterior (durante los periodos de pérdida de señal en cada órbita del Spacelab dicha señal se puede registrar a bordo).

Durante la fase de preparación del experimento LICOR, se llegó a la conclusión que para determinar con seguridad la respuesta del puente líquido (tégase en cuenta la posibilidad de pérdida de la señal de vídeo o su deterioro) era preciso utilizar al menos dos métodos de medida independientes: midiendo la deformación de la interfase de la columna líquida a partir de las imágenes obtenidas y midiendo las variaciones de la presión en los discos soporte. El grupo español se responsabilizó del desarrollo del primer método de medida mientras que el grupo de Battelle adquirió el compromiso de desarrollar discos-soporte provistos de los sensores apropiados. Como se puede observar en la Figura 1, y por razones constructivas, el orificio que comunica el fluido con el sensor de presión no está situado en el centro del disco (está a 12 mm del eje).

En el amplio período transcurrido desde la aceptación por la Agencia Europea del Espacio de la propuesta de experimentación en 1989 hasta su realización en 1993 tuvo lugar un intenso trabajo científico mediante el cual se sentaron las bases teóricas del experimento. Carece de sentido reproducir aquí los modelos desarrollados, ya publicados en revistas científicas especializadas y que se pueden encontrar en las referencias 1 a 10.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el plan de trabajo de la misión Spacelab-D2 inicialmente se reservó para la realización del experimento LICOR un periodo de 3 horas, periodo en el que se pretendía repetir dos

veces un mismo procedimiento experimental variando de uno a otro el líquido de trabajo, aceites de silicona de dos viscosidades distintas (10 y 20 cSt). El procedimiento nominal consistía en formar una columna cilíndrica de 50 mm de longitud entre discos de 15 mm de radio, efectuar inicialmente un barrido en frecuencia de 0 a 5 Hz (con una pendiente de 90 s/Hz) con el fin de determinar de forma aproximada las frecuencias para las cuales apareciera una resonancia y después realizar una serie de ensayos manuales (para frecuencias constantes cercanas a las de resonancia determinadas previamente) con el fin de afinar el valor de éstas. El mismo proceso se debía repetir más tarde con una columna también cilíndrica de 40 mm de longitud.

Durante la realización del experimento aparecieron una serie de dificultades que obligaron, como suele ser habitual, a modificar la secuencia nominal. Debido a la larga duración del experimento previo que se estaba realizando en el FPM (Stability of Long Liquid Columns, STACO, también responsabilidad del grupo de Lamf/ETSIA), el comienzo del experimento se retrasó ligeramente. Durante la formación de la primera columna (con aceite de silicona de una viscosidad de 10 cSt) una serie de deficiencias en el ajuste de la longitud llevaron a que la longitud obtenida fuese 47.4 mm (en lugar de 50 mm) y el volumen no fuese el correspondiente a un cilindro de esa longitud (33.5 cm^3) sino 35.3 cm^3 (es decir el volumen era un 5% mayor que el correspondiente al cilindro nominal). Al disminuir la longitud sí se alcanzó la separación nominal para la segunda columna (40 mm) pero no se obtuvo el volumen nominal (28.3 cm^3) sino 23.4 cm^3 , es decir un 13% menor que el cilíndrico. Finalmente se intentó repetir el mismo experimento con aceite de silicona de una viscosidad de 20 cSt pero el tiempo disponible para realizar el experimento se agotó y no se pudo llegar a establecer la configuración nominal. Afortunadamente, la misión se extendió un día más y se concedió tiempo adicional para la experimentación. En este tiempo extra, y con el fin de optimizar los recursos, se decidió a utilizar el fluido utilizado en el experimento anterior (de 5 cSt de viscosidad) y se obtuvo una columna de 38 mm de longitud y 27.7 cm^3 de volumen

(sólo un 3% mayor que el cilíndrico). Las configuraciones utilizadas en el experimento LICOR se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de las configuraciones ensayadas

Configuración	L [mm]	L/D	V [cm ³]	$V/\pi R^2 L$	ν [cSt]	A [mm]
1	47.7	1.59	35.5	1.05	10	2
2	40.4	1.35	23.4	0.83	10	2
3	38.0	1.27	27.7	1.03	5	1

Para cada una de las configuraciones se realizó un barrido en frecuencia (de 0 Hz a 5 Hz) y diversos ensayos con la frecuencia fija ajustada manualmente en torno a las de resonancia determinadas previamente durante el barrido en frecuencia. En la Figura 2 se muestra la variación de la frecuencia, de la amplitud de las presiones tanto en el disco que oscila (indicado con el subíndice R) como en el fijo (indicado con el subíndice F) y de la fase de dichas presiones en relación con la posición del disco que oscila y en la Figura 3 se indican, para cada uno de los barridos en frecuencia, los valores que alcanzan las presiones y sus desfases en función de la frecuencia de excitación en cada instante.

Los resultados de las frecuencias medidas a partir del barrido en frecuencias, de los ensayos a frecuencia fija, y determinados a partir del análisis de las imágenes se reflejan en la Tabla 2.

En dicha Tabla se han incluido también las predicciones teóricas para puentes líquidos de volumen cilíndrico ($V/\pi R^2 L = 1$) obtenidas a partir de los resultados publicados en la referencia 1. Como se puede observar, las predicciones teóricas dan valores de las frecuencias de resonancia entre un 10% y un 15% mayores que los medidos en el experimento LICOR, siendo las diferencias mayores para la configuración 2 (la que tiene un volumen menor que el cilíndrico), como era de esperar. Conviene señalar que para la

estimación de las frecuencias teóricas se ha supuesto que el líquido de trabajo tiene una viscosidad de 10 cSt, siendo la densidad de 920 kg.m^{-3} y la tensión superficial de 0.02 N.m^{-1} .

Tabla 2. Frecuencias de resonancia para los cinco primeros modos propios de las configuraciones ensayadas en el experimento LICOR

Configuración	Método de Medida	Frecuencias de Resonancia [Hz]				
		1	2	3	4	5
1	1.1. Barrido en frecuencia	0.53	1.20	2.13	3.12	4.28
	1.2. A frecuencia fija	0.53	1.21	2.19	3.38	4.30
	1.3. Obtenido del vídeo	0.48	1.20	2.04	3.40	4.31
	1.4. Estimación teórica	0.52	1.35	2.40	–	–
2	2.1. Barrido en frecuencia	–	1.53	2.70	3.96	–
	2.2. A frecuencia fija	–	1.58	–	–	–
	2.3. Obtenido del vídeo	0.64	1.53	2.70	3.96	4.98
	2.4. Estimación teórica	0.74	1.80	3.13	–	–
3	3.1. Barrido en frecuencia	0.80	1.77	3.00	–	–
	3.2. A frecuencia fija	0.80	1.78	–	–	–
	3.3. Obtenido del vídeo	0.78	1.77	3.00	–	–
	3.4. Estimación teórica	0.84	2.04	3.46	–	–

AGRADECIMIENTOS

Las investigaciones sobre el comportamiento de puentes líquidos en condiciones de baja gravedad realizados en Lamf/ETSIA están subvencionadas por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyecto de Investigación ESP 92-0001-CP).

REFERENCIAS

1. Sanz, A., "The influence of the outer bath in the dynamics of axisymmetric liquid bridges", *J. Fluid Mech.* 156, pp 101-140 (1985).
2. Langbein, D., "Oscillations of liquid columns", in *Fluid Science and Material Science in Space*, H.U. Walter, Ed., Springer Verlag, London. (1987)
3. Meseguer, J., "Axisymmetric long liquid bridges in a time-dependent microgravity field", *Appl. microgravity tech.* 1, pp 136-141. (1988)
4. Bauer, H.F., "Natural frequencies and stability of circular cylindrical immiscible liquid systems", *Appl. microgravity tech.* 2. pp 27-44. (1989)
5. Sanz, A., López-Díez, J., "Non-axisymmetric oscillations of liquid bridges", *J. Fluid Mech.* 205, pp 503-521 (1989).
6. Bauer, H.F., "Response of a viscous liquid column to axial excitation in zero-gravity", *Zamm, Z. angew. Math. Mech.* 70, 9, pp 359-369. (1990)
7. Meseguer, J., Sanz, A., Perales, J.M., "Axisymmetric long liquid bridges stability and resonances", *Appl. microgravity tech II*, Issue 4, pp 186-192. (1990)
8. Meseguer, J., Perales, J.M., "A Linear Analysis of g-Jitter Effects on Viscous Cylindrical Liquid Bridges", *Physics of Fluids A*, Vol. 3, pp 2332-2336 (1991).
9. Meseguer, J., Perales, J.M., "Non-steady Phenomena in the Vibration of Viscous Cylindrical Long Liquid Bridges", *Microgravity Science and Technology*, Vol. 5, pp. 69-72 (1992).
10. Perales, J.M., Meseguer, J., "Theoretical and Experimental Study of the Vibration of Axisymmetric Viscous Liquid Bridges", *Physics of Fluids A*, Vol. 4, pp 1110-1130 (1992).

PIES DE FIGURAS

Fig. 1. Esquema de las configuraciones fluidas ensayadas en el experimento LICOR. 1) puente líquido, 2) orificio de inyección, 3) disco fijo, sólo desplazable axialmente, 4) disco oscilante, 5) orificios que comunican el puente líquido con los sensores de presión.

Fig. 2.1. Variación con el tiempo, t , de la frecuencia, f , la presión, P , y la fase, φ , en el ensayo correspondiente a la configuración 1. Los subíndices R y F indican valores medidos en el disco que oscila y en el fijo, respectivamente.

Fig. 2.2. Variación con el tiempo, t , de la frecuencia, f , la presión, P , y la fase, φ , en el ensayo correspondiente a la configuración 2. Los subíndices R y F indican valores medidos en el disco que oscila y en el fijo, respectivamente.

Fig. 2.3. Variación con el tiempo, t , de la frecuencia, f , la presión, P , y la fase, φ , en el ensayo correspondiente a la configuración 3. Los subíndices R y F indican valores medidos en el disco que oscila y en el fijo, respectivamente.

Fig. 3.1. Variación con la frecuencia de excitación, f , de la presión, P , y el desfase, φ , en el ensayo correspondiente a la configuración 1. La letra R indica valores medidos en el disco que oscila, mientras que la letra F indica valores medidos en el disco fijo.

Fig. 3.2. Variación con la frecuencia de excitación, f , de la presión, P , y el desfase, φ , en el ensayo correspondiente a la configuración 2. La letra R indica valores medidos en el disco que oscila, mientras que la letra F indica valores medidos en el disco fijo.

Fig. 3.3. Variación con la frecuencia de excitación, f , de la presión, P , y el desfase, φ , en el ensayo correspondiente a la configuración 3. La letra R indica valores medidos en el disco que oscila, mientras que la letra F indica valores medidos en el disco fijo.

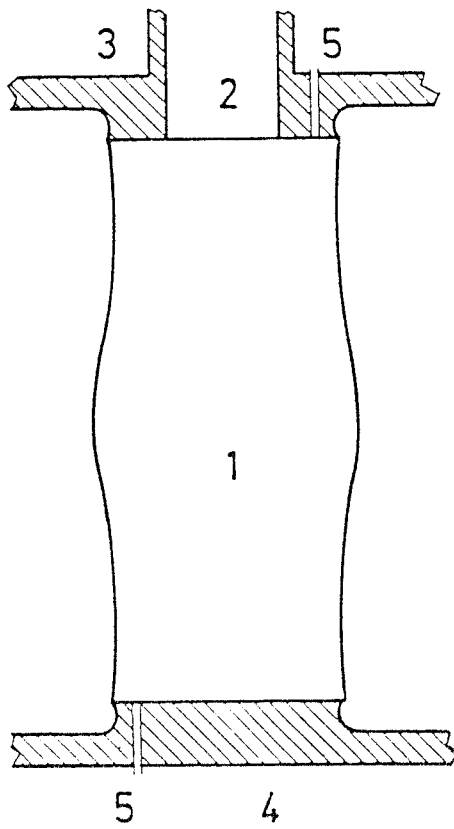


Fig. 1

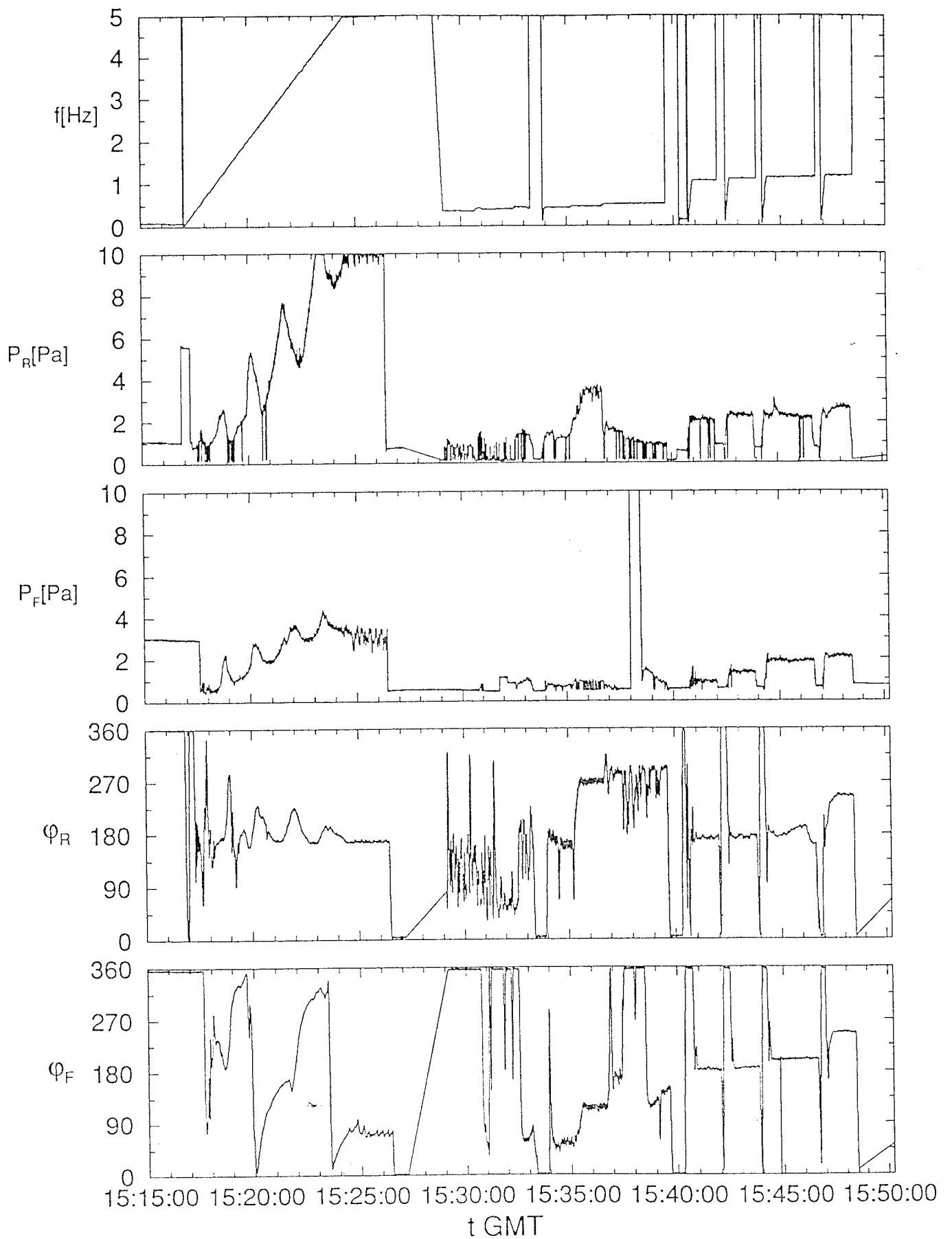


Fig 2.1

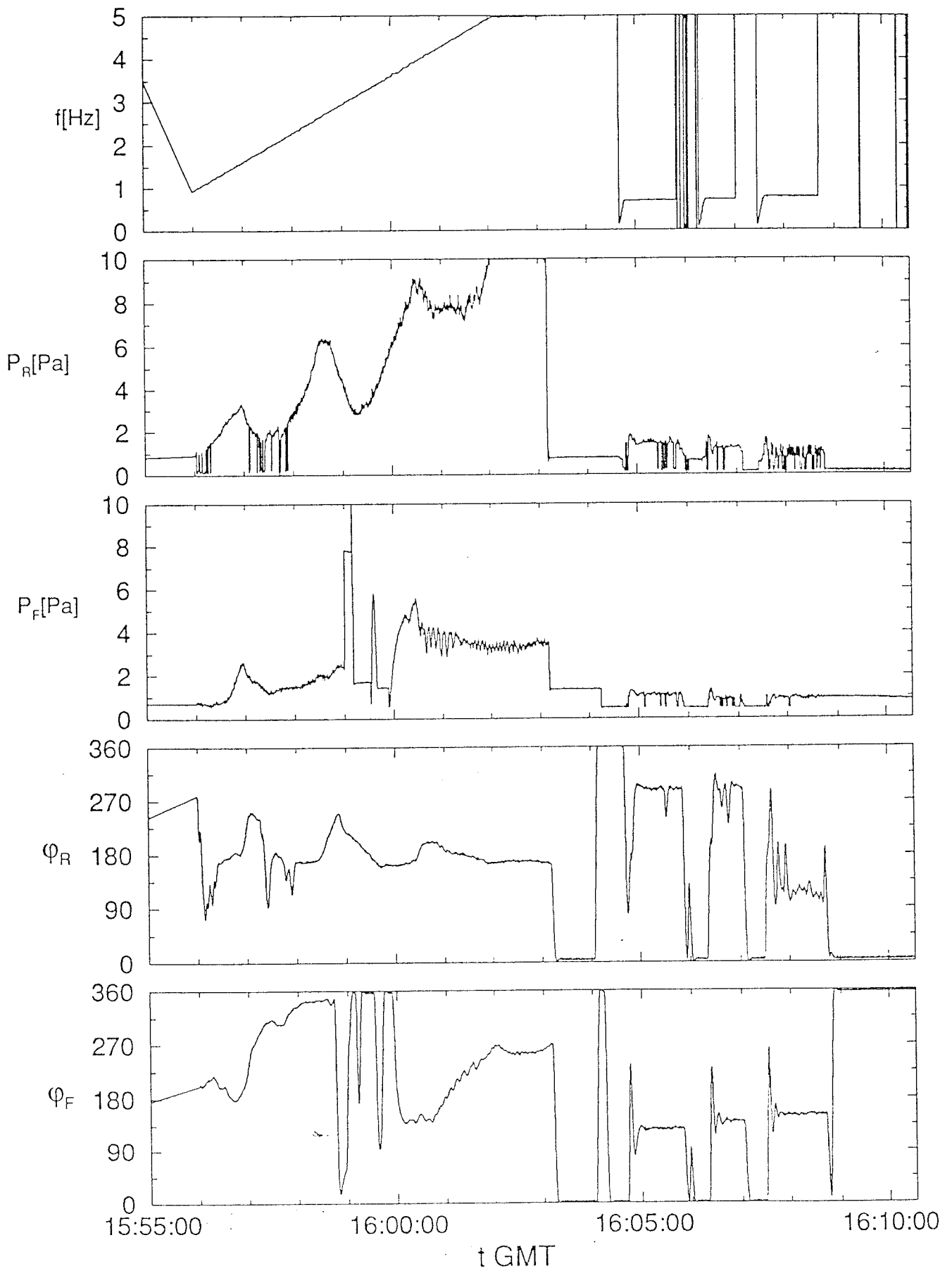


Fig 2.2

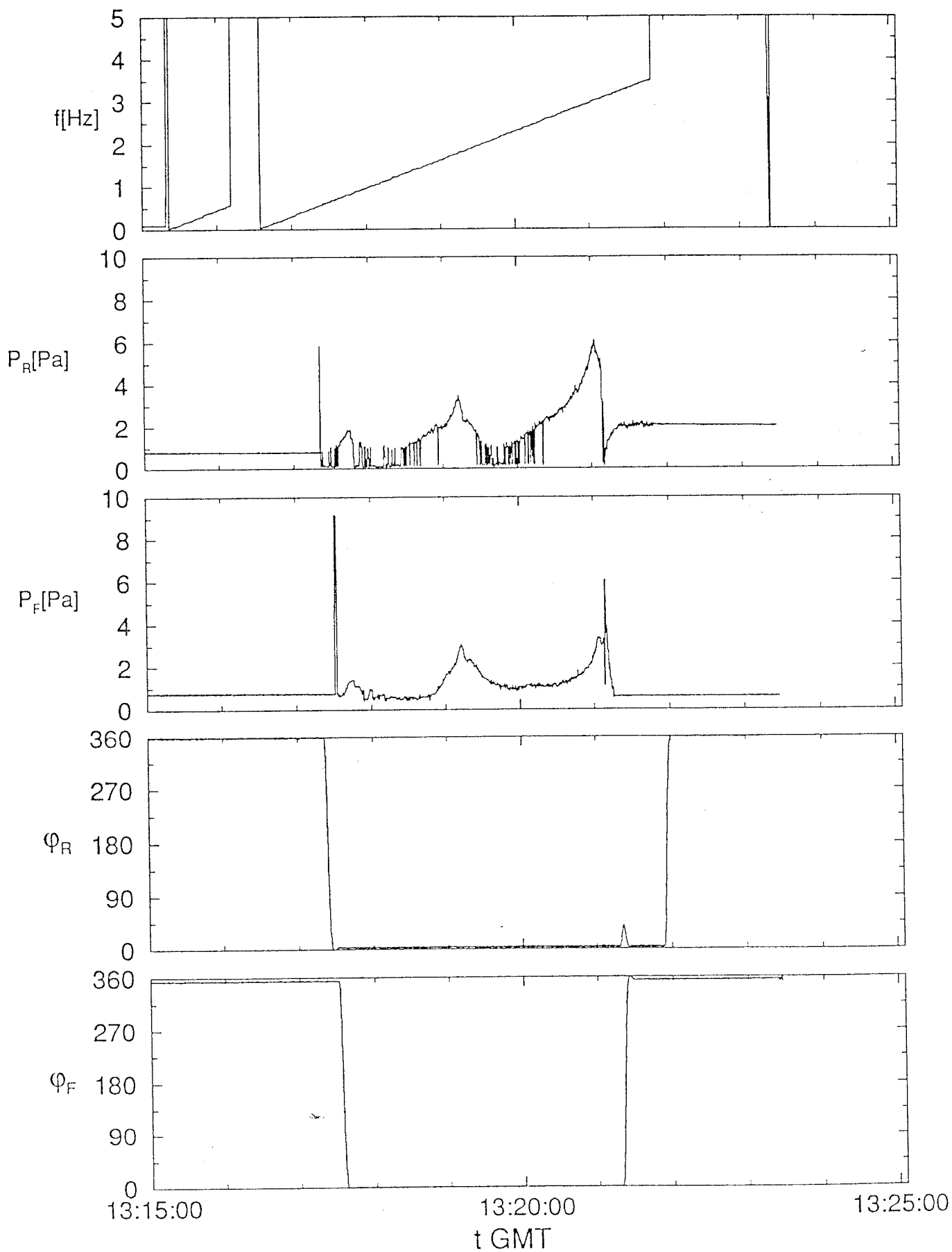


Fig 2.3

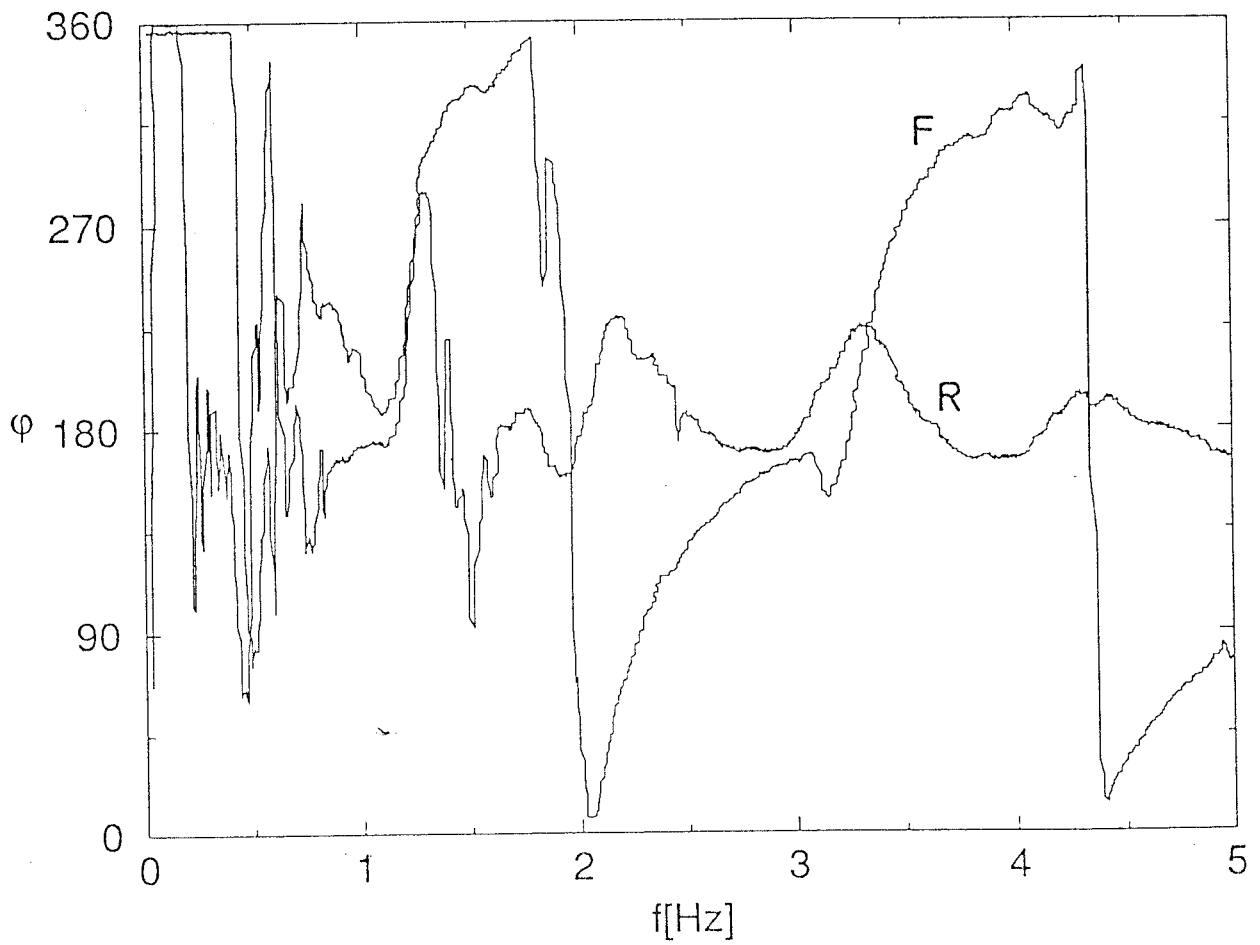
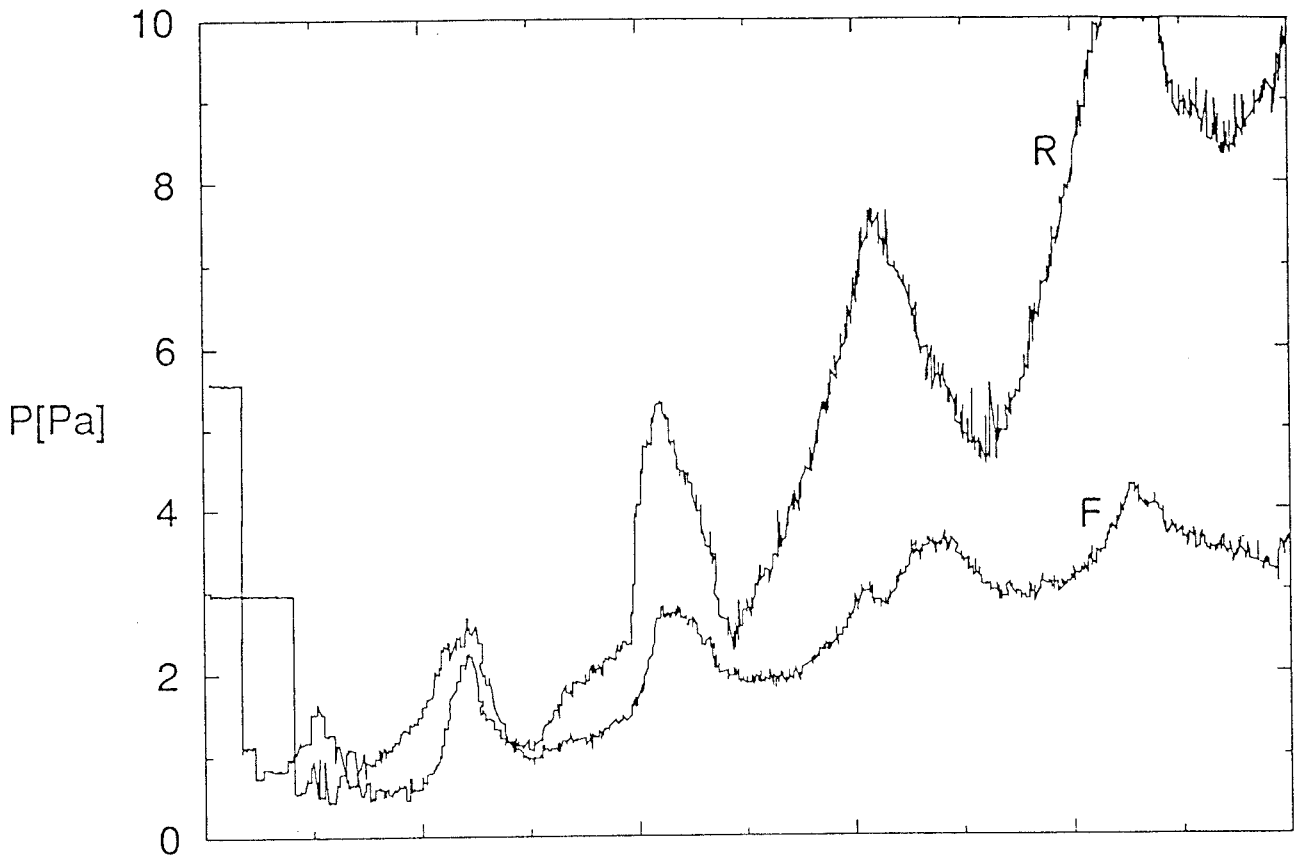


Fig 3.1

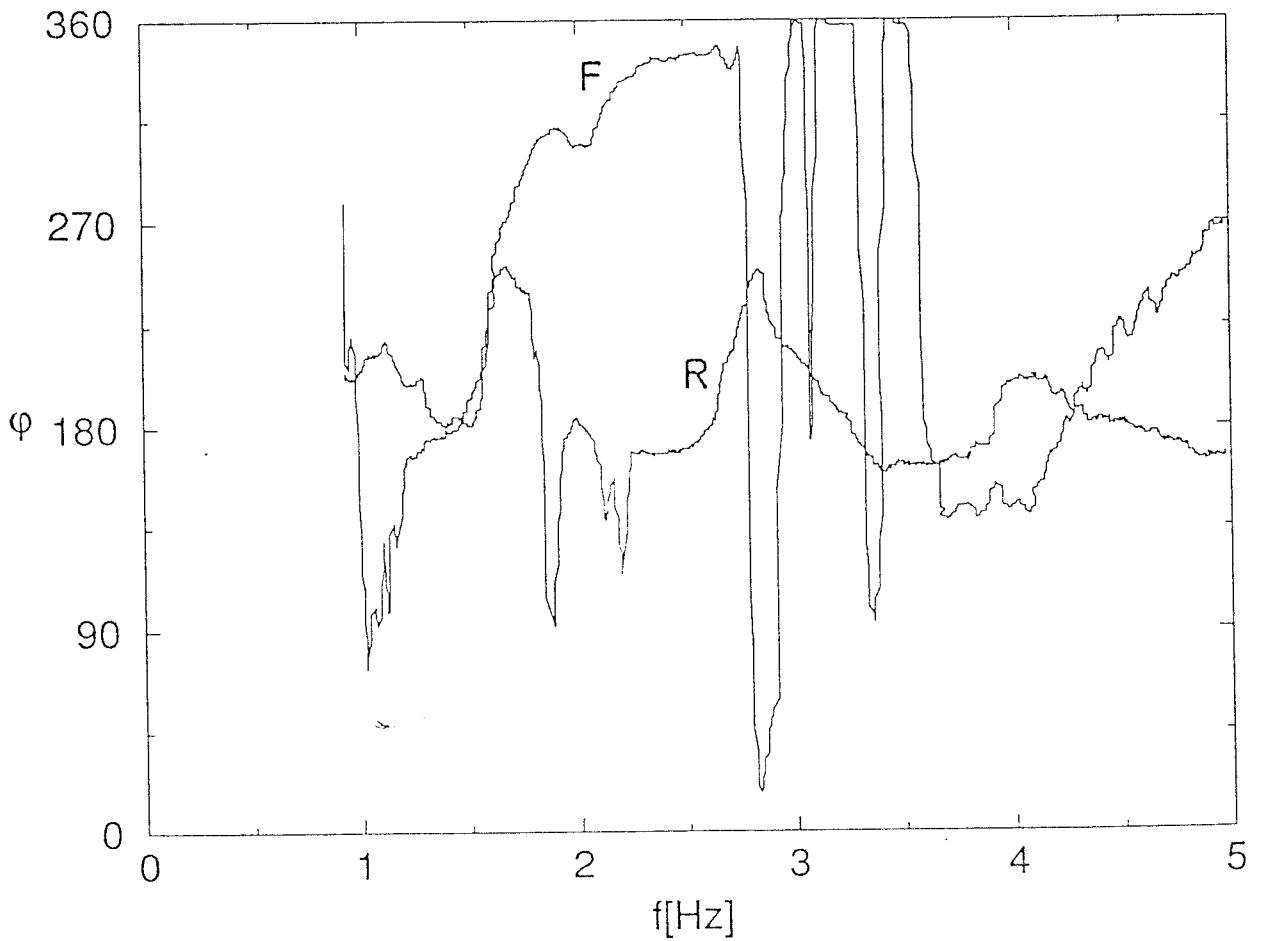
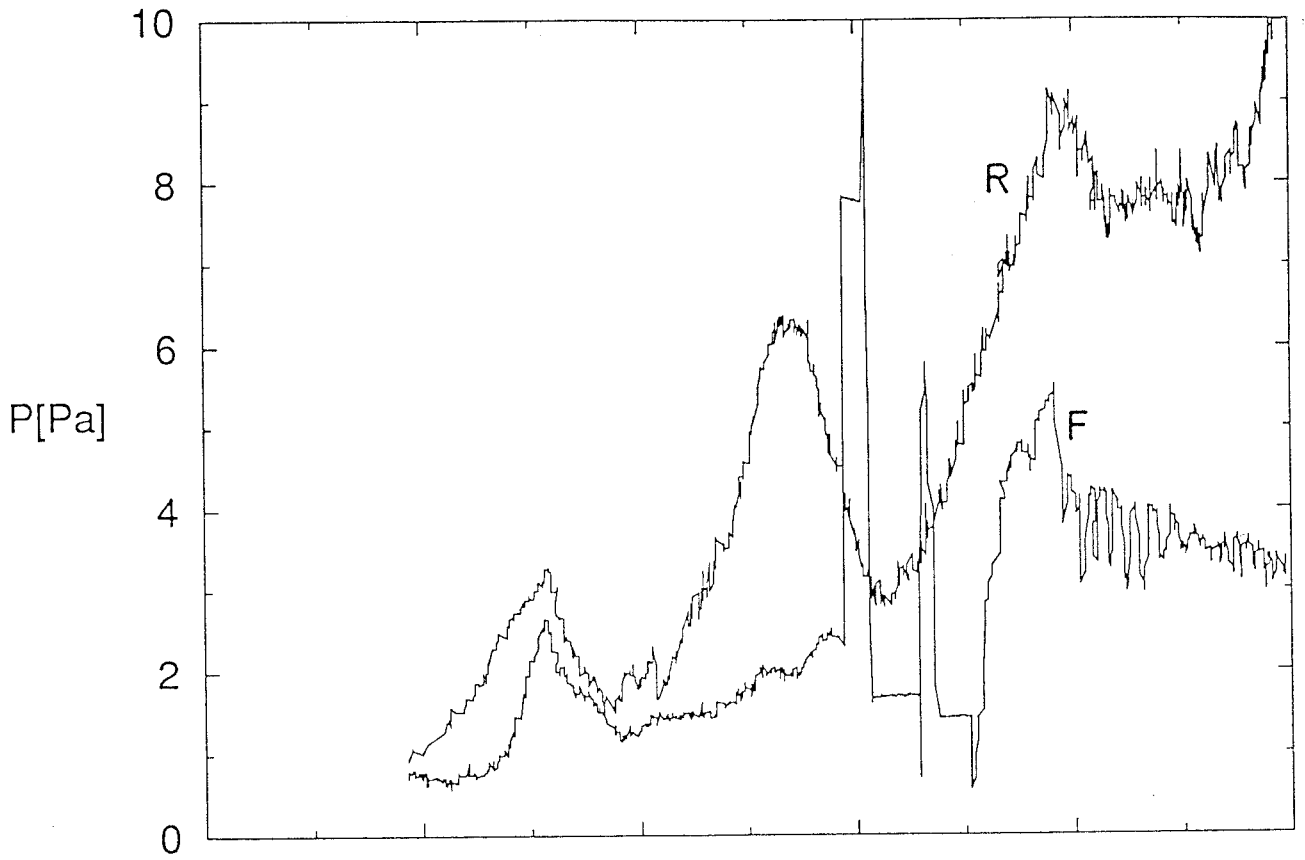


Fig. 3.2

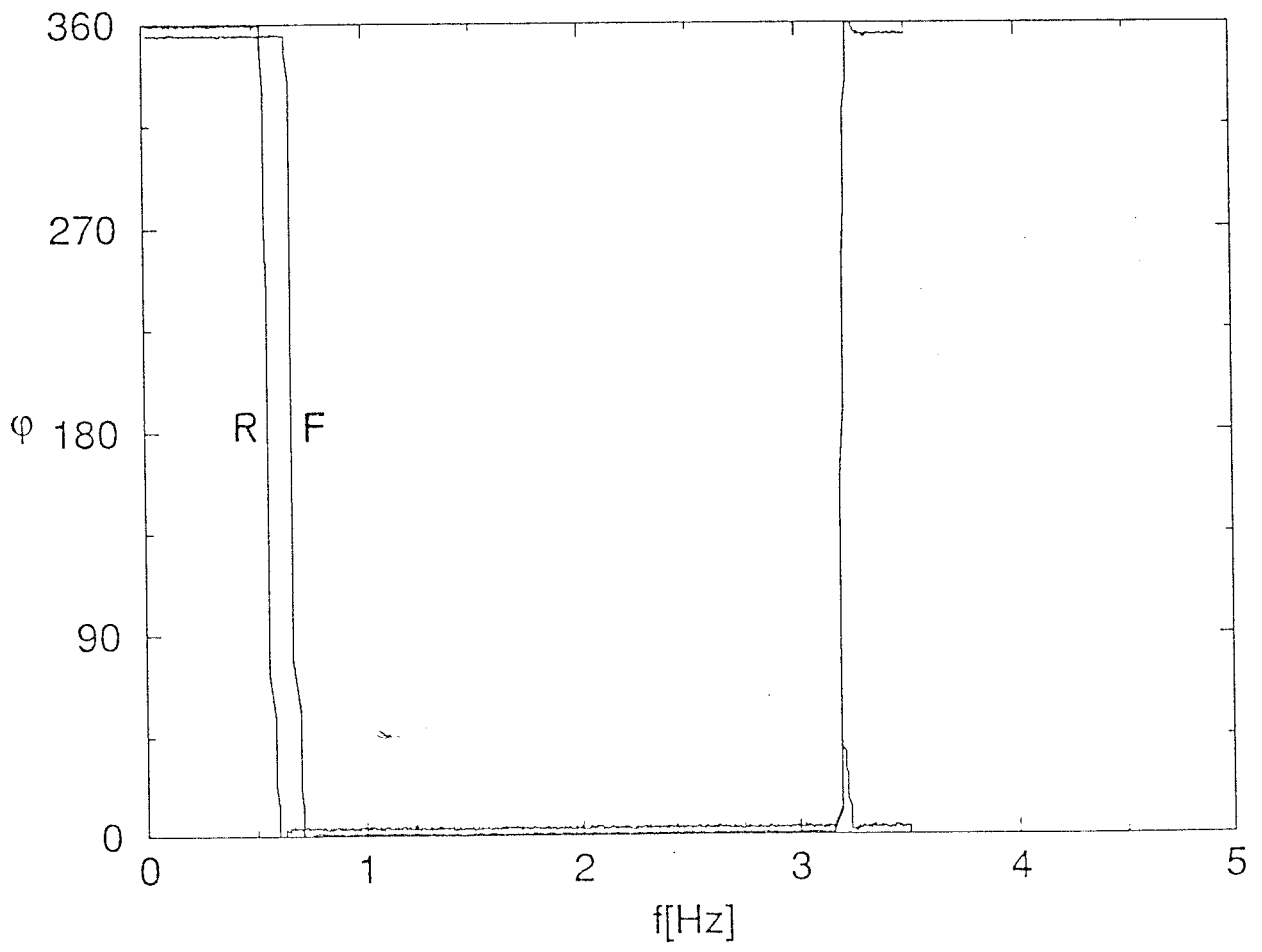
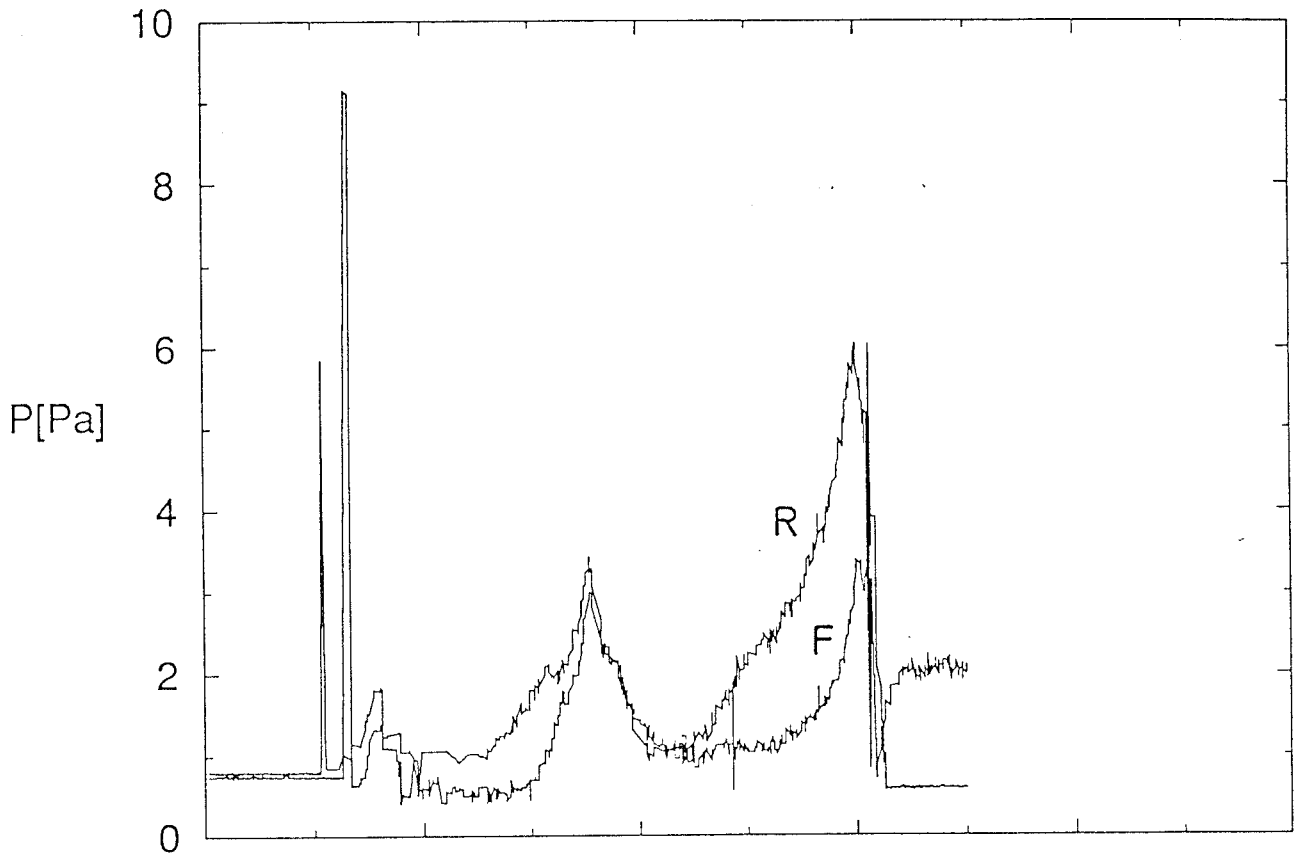


Fig 82