

〈論 文〉

튜브와 지지대사이의 동적상호 충격력 측정장치 특성규명에 관한 연구

A Study on the Characteristics of the Tube-to-Support Dynamic Impact Force Measurement Facility

김 일 곤* · 박 진 무**

Il-Kon Kim and Jin-Moo Park

(1994년 11월 24일 접수 ; 1995년 2월 20일 심사완료)

ABSTRACT

Flow-induced vibration in heat exchanger (or fuel rod) in nuclear power plant can cause dynamic interactions between tubes and tube supports resulting in fretting-wear. To increase the reliability and design life of heat exchanger components, design criteria that establish acceptable limits of vibration and minimize fretting-wear are necessary. The fretting-wear rate is dependent upon material combination, contact configuration, environmental conditions and tube-to-tube support dynamic interaction. It is demonstrated that the fretting-wear rate correlates well with tube-to-support contact force or work rate. The tube-to-support dynamic interaction, which consists of dynamic contact forces and tube motion, is used to relate single-span wear data to real heat exchanger configurations consisting of multi-span tube bundles. This paper describes the test facility to measure tube-to-support dynamic impact force and reports its dynamic characteristics through the four impact tests - a force transducer independent and external impact tests, central ring inside impact test and additional cylinder impact test. Through the tests the impact parameter change dependent upon the material difference of impacting ball is studied, and the impact parameters of Force Transducer Assembly components are measured. And also the dynamic behavior of Force Transducer Assembly is analyzed. The force measurement technique herein is shown to provide a reasonable measure of dynamic contact forces.

기 호 설 명

K : 충격력 측정장치의 스프링비 (stiffness)
 M : 충격력 측정장치의 질량
 m : 구의 질량
 l : 구진자의 길이
 F : 충격력
 P : 구의 움직인 양 = 2mv

g : 중력 가속도
 C_1, C_2, C_3, C_4 : 충격력 측정장치의 각 force transducer
 가 받는 충격력
 $X(t)$: 충격력 측정장치 central ring의 변위
 v : 구가 충격되는 순간의 속도
 k : 구의 움직임 양을 결정하는 상수
 α : 구진자의 입사각
 ω_0 : 충격력 측정장치의 박동 (pulsation) 주파
 수 = $(K/M)^{1/2}$
 ξ : 충격력 측정장치의 viscous감쇠

*정회원, 한국원자력연구소 계통기계분야

**고려대학교 기계공학과

- τ : 충격력 측정장치의 응답주기(period)
- $\Delta\tau$: 대략적인 적분을 할 경우의 충격력 측정장치 응답주기
- τ_c : 최종 충격시간의 충격력 측정장치 응답주기

1. 서 론

열교환기의 튜브나 원자력발전소 노심의 핵연료봉 등은 그 모양이 직경에 비해 길이가 가느다란 튜브의 집합체로 이루어져 있을뿐아니라, 이들 부품들은 경제성에 대한 요구 때문에 점차 튜브의 지름을 감소시키고 지지대의 갯수를 줄이므로써 이로인해 구조물의 강성도가 감소되고 있으며, 또한 이들 부품들의 열전달성능의 향상을 위해서 튜브집합체가 더욱 빠른 유속에 놓여 있도록 요구되고 있다. 이와 같은 요구는 과도한 유체유발진동(flow-induced vibration)에 의해 구조물의 파손을 야기시킬 수 있고, 이러한 파손은 발전소나 화학공장의 가동정지를 가져오므로써 경제적으로 매우 큰 손해를 입힐 수 있다. 이러한 열교환기 튜브나 핵연료봉의 과도한 유체유발진동에 의해 발생하는 문제로는 튜브의 마모(fretting-wear), 피로(fatigue), 시스템운전상의 어려움 및 음향잡음(acoustic noise) 등이 있다. 튜브손상의 주된 원인은 금속적측면의 부식현상과 기계적인 측면의 마모와 피로 등으로 그 원인을 구분할 수 있는데, 이중 기계적 현상인 마모는 유체유발진동에 의해 튜브와 튜브 또는 튜브와 지지대 사이의 마찰 및 접촉충돌 등의 동적상호작용이 지속적이며 반복적으로 가해질때 발생하는데, 이 마모는 유체의 난류(turbulence)에 의한 유발진동이 주원인이고 이것은 대체로 진폭이 작아서 장시간에 걸쳐서 관을 마모시키며 결국 관을 파손시킨다.

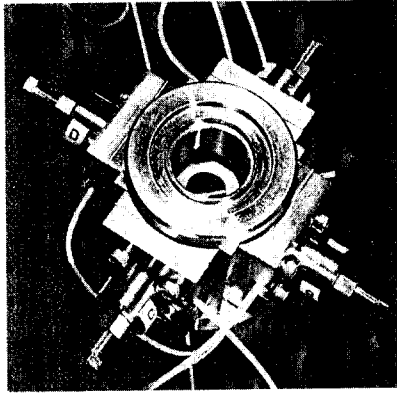
열교환기 및 핵연료봉의 설계단계에서는 진동해석에 의해 유체유발진동에 의한 튜브나 봉의 손상을 피할 수 있을 뿐아니라, 부품의 신뢰성을 높이고 수명을 늘리기 위해서는 이 진동해석결과와 함께 마모에 대한 정보가 필요로 하게 된다. 이들 두가지 정보 중 진동해석인 튜브의 유체유발진동에 대한 해석은 그동안 많은 사람들이 이에 관련된 연구를 해왔으며⁽¹⁾, 이 진동의 결과현상인 마모와 관련된 주요변수 들은 튜브의 움직임 형태, 중간부위의 변위, 가진주파수 그리고 지지대에서의 충격력과 그밖에 기계설계에 의한 주요변수인 튜브/지지대 간격, 튜브-지지대 접촉면적, 재질, 경도 및 시스템온도 등이

있는데, 이렇게 복잡한 튜브의 마모손상에 대한 평가는 (1) 튜브와 지지대 사이의 동적상호작용의 이해, (2) 재질과 실험조건이 마모에 주는 상관관계, (3) 충격마모 메카니즘의 실제적인 수식화 등의 3가지를 요구하게된다⁽²⁾. 이들중 튜브와 지지대사이의 동적상호작용을 위해서 Ko,P.L.은 열교환기의 조건을 상사한 single-span보에 대한 실험을 수행하였고⁽³⁾, Axisa 외 2명은 간격을 갖는 Multi-span 튜브의 충격실험을 수행하였으며⁽⁴⁾, Argonne National Lab.의 Shin, Y.S. 외 2명은 실제 1/3길이의 Croloy 튜브에 대해 기하학적 조건 및 가진크기 등에 따른 Multi-span 튜브에 대해 실험을 수행하였다⁽⁵⁾. 그리고 Rogers,R.J.와 Pick,R.J.는 열교환기 튜브의 지지대에 대한 충격력의 마찰, 감쇠, 간격 등에 대한 영향을 조사하기 위해 실험을 수행하여, 이것을 유한요소해석 결과와 비교 하였으며⁽⁶⁾, Chank River의 Fisher,N.J.와 Ingham,B.는 튜브와 지대사이의 충격시험장치 측정기술에 대해 기술하였다⁽⁷⁾.

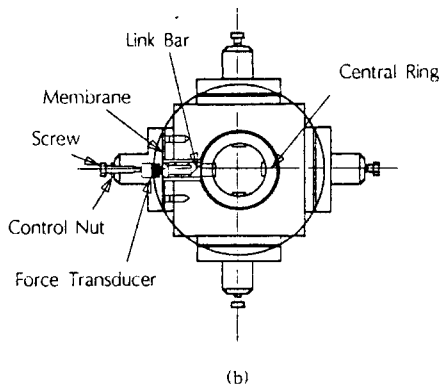
본 연구에서는 Ko,P.L.의 충격실험장치에 대한 내용을 기반으로하여⁽³⁾, 유체유발진동에 의한 튜브와 지지대사이의 상호충격특성을 측정하기위해 충격력 측정장치인 Force Transducer Assembly를 개발, 이 장치에 의한 충격력측정방법을 제안하였으며, 충격력측정 장치의 특성파악실험시 재질이 다른 동일한 크기의 구에 의한 충격실험을 수행하므로써 재질차이에 따른 충격력의 주요변수인 충격량(Fdt)과 물질의 운동량($2mv$)비 β 와 충격시간(impact duration)상의 차이점을 규명하였다. 그리고, 충격력측정 장치의 충격력크기에 따른 주요변수변화 및 충격시의 거동분석과 충격력측정장치의 주요부품별 동적특성실험을 수행 하므로써 이들을 통해 이 장치에 의한 튜브의 동적상호충격실험의 유효성을 확인 할 수 있었다.

2. 충격력측정장치

튜브의 충격력측정을 위해 개발된 Force Transducer Assembly와 이 장치의 단면도는 Fig. 1과 같으며, 이 장치의 재질은 유체내에서의 실험수행을 가능하게하기 위해 부식성을 고려하여 stainless steel로 되어있다. 여기서 볼 수 있는 바와 같이 튜브의 충격시 발생하는 충격신호는 이 장치의 한가운데에서 central ring에 의해서 튜브가 가하는 충격력을 직접 받고, 이 충격력은 연결막대 및 박판(membrane)을 통해 각기 90°씩 떨어져 힘을 측정하



(a)



(b)

Fig. 1 Force Transducer Assembly and its cross-section

는 force transducer에 전해지게 된다. 이 transducer는 KISTLER type 9257A로써 \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} 3축방향의 힘을 측정할 수 있을 뿐아니라, 충격과 같은 고주파수 측정을 위해 10^3Hz 이상의 고주파수영역의 측정범위특성을 갖고 있다. 그리고, central ring은 가능한한 충격신호가 전달도중 변질 되지 않도록 하기위해 두께를 되도록 얇고 stiff하게 설계하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험 장치

개발된 충격력측정장치의 특성을 구하기 위해서 구진자에 의한 충격실험을 수행하였는데, 이 실험장치에 대한 개략도는 Fig. 2와 같다. 여기서 충격실험을 위해 사용된 구진자는 재료차이에 따라 주요변수에 미치는 영향을 보기 위해 지름이 $\phi=19\text{mm}$ 인 경강, 연강, 황동의 3가지를 사용하였는데, 이들은 각각 경강구는 28.2g, 연강구는 28.4g, 그리고 황동구는 30.7g이었고, 충격은 구를 7.5°부터 45°까지 7.5° 간격으로 늘려가며 자유낙하시킴으로써 충격이 가해지도록 하였다. 이때 충격신호는 "Gould, High Frequency Recording System 2800W"를 사용하여 기록하였으며, 이 기록된 신호는 HP9816 Calcula-

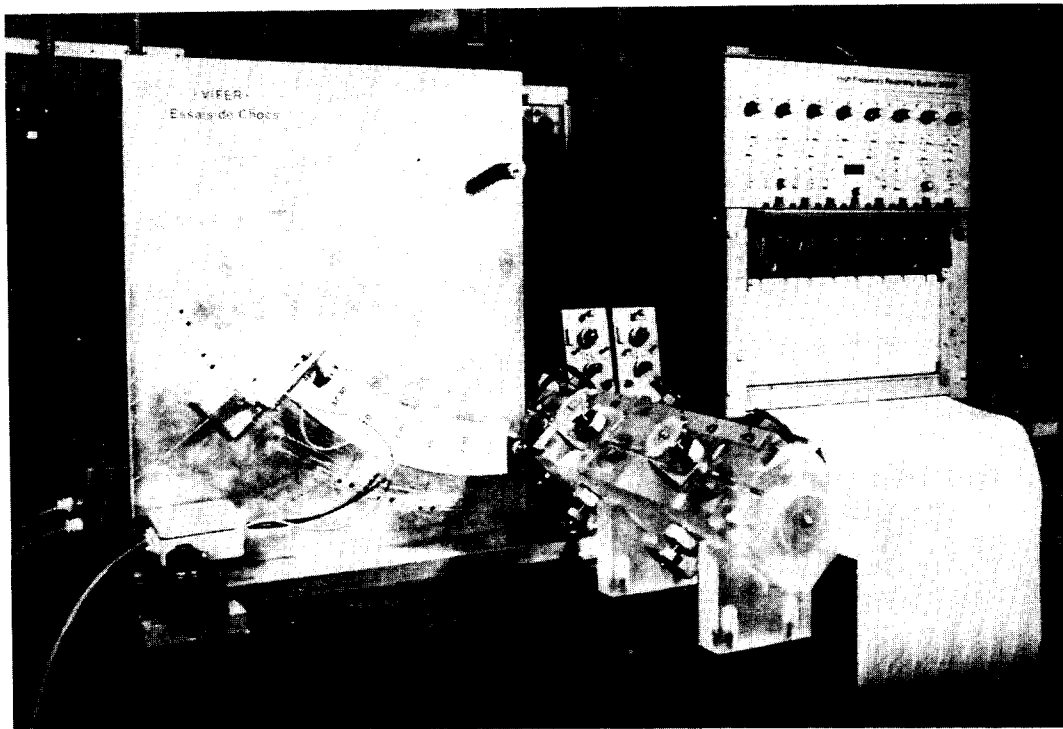


Fig. 2 Test facility arrangement for the characteristic test of Force Transducer Assembly

tor에 의해 그래프화 하였다.

실험시 구의 질량이 m 이고, 진자의 길이가 l 이며, 구의 입사각도가 α 일 때 구의 속도 v 는 다음식과 같이 표현 될 수 있다.

$$v = \sqrt{2gl(1 - \cos\alpha)}$$

그리고 이 값에 질량을 곱한 구의 움직이는 양(= kmv)과 충격력측정장치의 force transducer에서 구한 값을 비교한다. 즉,

$$kmv = \int_0^t Fdt$$

이때 $k=2$ 로 이 값에 대한 설명은 부록에 기술되어 있다.

3.2 실험 방법

충격력측정장치의 특성과약을 위해 부품별로 4가지 실험을 수행하였는데, 그것은 transducer 1개만의 독립특성실험과 central ring의 특성과약을 위한 force transducer외력 충격실험 및 central ring내벽 충격실험을 수행하였으며, transducer면 이외에서 충격을 가하는 경우의 특성조사를 위해 cylinder에 의한 충격실험 등을 구진자의 자유낙하충격에 의해 실험을 수행하였다.

(1) Force Transducer 독립특성실험

충격력측정장치 첫번째 특성실험으로써 충격력측정장치에 부착된 force transducer중 1개만의 독립된

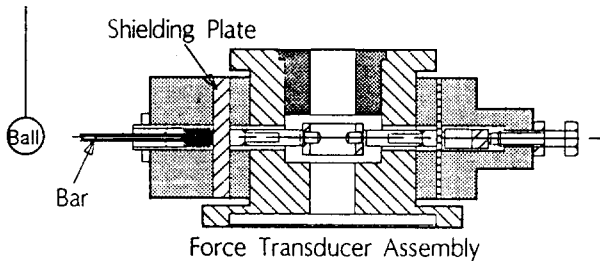


Fig. 3 Schematic diagram of a transducer independent impact test of Force Transducer Assembly

특성을 구하는 실험을 수행하였는데, 이를 위해서 Fig. 3과 같이 force transducer와 central ring사이에 새로운 차폐막을 삽입시키므로써 1개의 transducer가 다른 transducer와 독립되게 하였다. 그리고, 구에 의해 측정장치에 충격을 주기위해 가는 막대를 독립된 force transducer에 접촉시킨 후 구에 의해 막대에 충격을 가하여 그 결과를 위에서 기술한대로 $2mv$ 와 $\int Fdt$ 값을 구하여 이를 비교하였다.

(2) Force Transducer 외력충격 실험

이 실험은 충격력측정장치의 부품인 central ring의 특성과 박판(membrane)의 전달성(transmissibility)을 검증하고, force transducer의 기능을 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 1개의 force transducer에 구로 충격을 가한 후 다른 transducer들에 주는 영향을 조사하였다.

(3) Central Ring 내벽의 충격실험

Central ring의 충격특성을 파악하기 위해 Fig. 5와 같이 막대에 의해 충격력측정장치의 central ring에 구로 충격을 가하며, force transducer에서 응답을 측정하였으며, 이를 가지고 구의 움직임 $2mv$ 와 충격력 $\int Fdt$ 의 비를 구하였다.

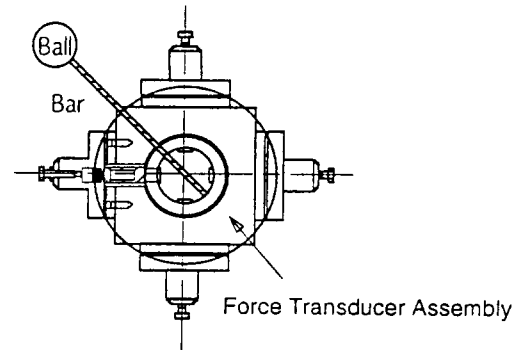


Fig. 5 Schematic diagram of central ring impact characteristic test of Force Transducer Assembly

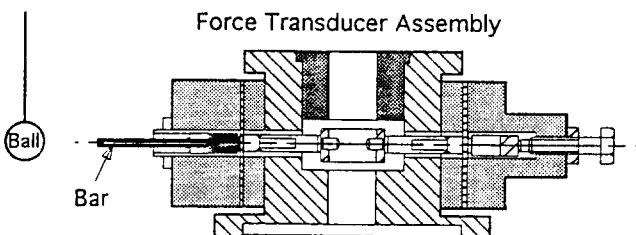


Fig. 4 Schematic diagram of an external impact test of Force Transducer Assembly

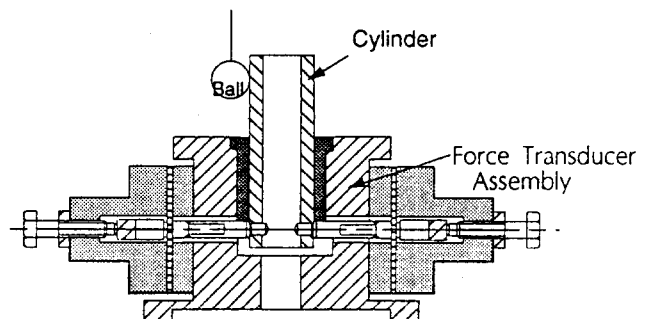


Fig. 6 Schematic diagram of the cylinder impact test of Force Transducer Assembly

(4) Cylinder에 의한 충격실험

이 실험은 force transducer와 같은 면에 충격을 가한 경우와 다른 면에 충격을 가한 경우의 충격력 측정장치 특성변화를 알아보기 위해 Fig. 6과 같이 높이 50mm의 cylinder를 central ring 대신 설치하여 구로 cylinder 상단에 충격을 가하며 거동을 분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

이들 실험결과 얻어진 값은 충격특성을 결정하는 주요변수인 충격량, 충격시간 및 감쇠비 등으로써 이들을 통해 충격력측정장치의 거동과 동적충격특성을 분석하였다.

4.1 Force Transducer 독립특성실험

(1) 충격량

충격력측정장치의 force transducer A에 구에 의해 충격을 줄때 응답신호는 Fig. 7과 같으며, 이 신호는 독립된 transducer A에서만 발생하였다. 이 응답신호로부터 알 수 있는 것은 이 transducer의 충격시간(impact duration)은 150 μ sec. 이었으며, 이 실험을 통해 다음과 같은 특성치들을 구하였다.

- 충격순간의 구의 속도 v 및 움직인 양 $2mv$
- $t=1.5$ milisec.까지의 충격량 $\int Fdt$ (Table 1 참조)
- 측정된 값들로 부터 구의 입사각에 따른 충격량에 대한 구의 움직임비 $\beta = \int Fdt / 2mv$ 평균값은 다음과 같다. :
- 경 강 : $\beta = 0.896$
- 연 강 : $\beta = 0.890$
- 황 동 : $\beta = 0.752$

위로부터 β 는 충격의 진폭에 따라 달라지는 것을

알 수 있으며, 황동구가 강구보다 β 값이 작다는 것을 알 수 있다.

(2) 충격시간

구의 종류별 충격시간은 다음과 같고, 이 3개의 구중 황동구가 충격시간이 가장 길었다.

- 경 강 : 185~150 μ sec
- 연 강 : 180~150 μ sec
- 황 동 : 195~140 μ sec

4.2 Force Transducer 외력충격실험

실험결과 하나의 예로써 경강구에 의한 충격측정

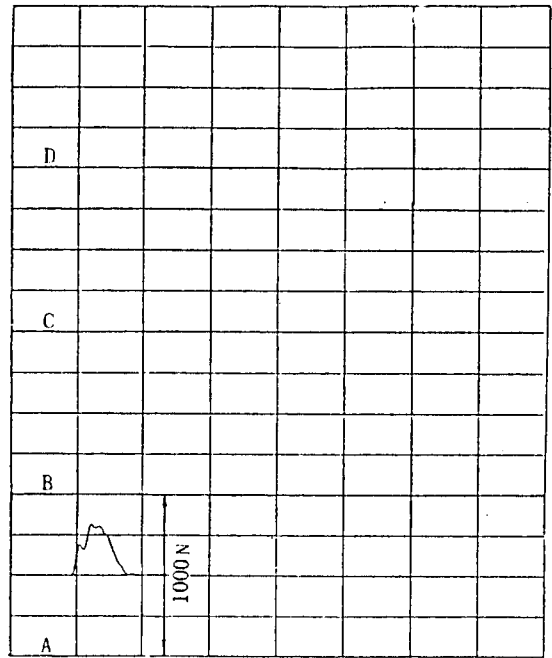


Fig. 7 Typical response of a transducer independent impact test when hard steel ball is dropped with an incidence angle of 15°

Table 1 Impact force of transducer A in case of a independant impact test of Force Transducer Assembly

Inc. angle $\alpha(^{\circ})$	Imp. vel. m/s	Bronze ball		Mild steel ball		Hard steel ball	
		$F \times dt$ (N x sec.)	$2mv$ N x sec.	$F \times dt$ (N x sec.)	$2mv$ N x sec.	$F \times dt$ (N x sec.)	$2mv$ N x sec.
7.5	0.26	1.06E-02	1.58E-02	1.22E-02	1.46E-02	1.16E-02	1.45E-02
15	0.51	2.37E-02	3.14E-02	2.51E-02	2.89E-02	2.37E-02	2.87E-02
22.5	0.75	3.47E-02	4.62E-02	3.71E-02	4.26E-02	3.79E-02	4.23E-02
30	1.01	4.52E-02	6.23E-02	5.24E-02	5.74E-02	5.18E-02	5.7 E-02
37.5	1.26	6.22E-02	7.75E-02	6.57E-02	7.15E-02	6.53E-02	7.1 E-02
45	1.51	7.03E-02	9.3 E-02	8 E-02	8.57E-02	7.89E-02	8.51E-02

시간범위가 1.5milisec.인 경우는 Fig. 8에 주어졌으며, 이들로 부터 다음과 같은 점을 알 수 있었다. :

Force transducer B와 D의 응답신호치는 A와 C의 크기의 10~15%이다. 그리고 force transducer A와 C 사이에는 22 μ sec.의 시간간격을 가지고 있으며, A와 C 사이 및 B와 D사이에는 17 μ sec. 정도의 시간간격을 갖고 있다. 그리고, 이 transducer A, B, C 및 D의 신호는 모두 압축력(compression)을 의미한다. Transducer A와 C의 응답신호상에서 충격 후 나타나는 sine감쇠파는 이들 사이에 위상이 서로 반대임을 나타내며, 이것은 7800Hz까지 측정된다. 이 주파수는 충격방향에 의한 충격력측정장치의 인장(tension) 및 압축(compression)방향의 움직임과 관계가 있으며, 좀더 자세한 내용은 4.3절에서 기술하고 있다.

Central ring의 변형되지 않은 rigid한 움직임(mode 1)은 mode 2의 변형에 영향을 준다. 이 응답신호는 transducer A에서는 33Hz, transducer B에서는 30.2Hz에서 측정이 되었으며, 이 신호의 위상과 관계된 설명은 다음과 같다. :

- Transducer AC와 BD는 자기 같은 방향의 위상을 갖고 있으며, 이들 둘씩의 transducer는 서로 반대방향의 위상을 갖고 있다.
- 위상과 관련된 주파수는 상위 mode와 관련된 움직임을 갖고 있다.

Force transducer A에 충격을 가할 경우 충격력 측정장치의 움직임은 transducer A는 압축되고, central ring은 측방향으로 변형된다. 그리고 central ring이 변형된 상태에서, transducer C와 D는 압축된 상태로 움직이며(Fig. 9 참조), 이 충격력측정장치는 충격이 가해지는 방향으로 oscillation하고,

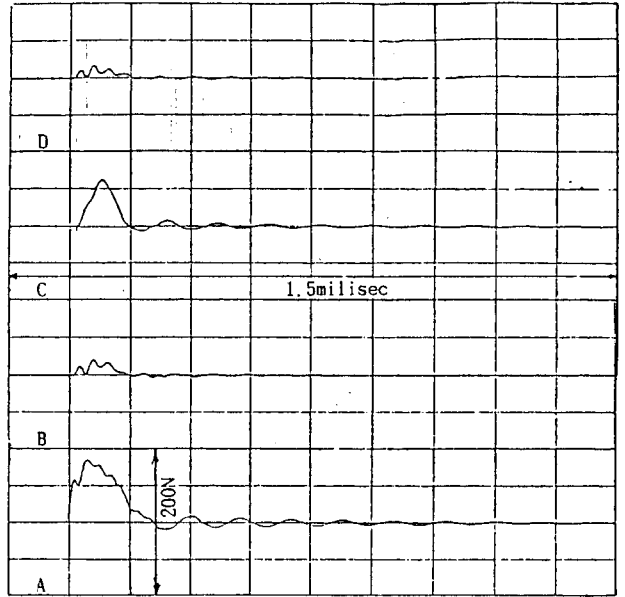


Fig. 8 Typical response of transducer external impact test of Force Transducer Assembly when hard steel ball is dropped with an incidence angle of 7.5° (1.5milisec. range)

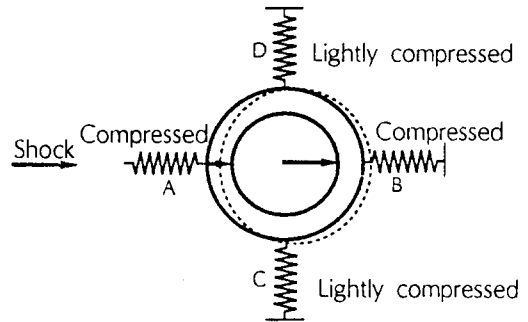


Fig. 9 Force Transducer Assembly behavior when the external impact is applied to transducer A

Table 2 Impact force in case of transducer external impact test of Force Transducer Assembly (* 10⁻² has to be multiplied to all below values)

Incid. Angle (°)	Bronze ball				Mild steel ball				Hard steel ball			
	∫ Fdt (N x sec.)				∫ Fdt (N x sec.)				∫ Fdt (N x sec.)			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
7.5	1.23	0.57	0.13	0.15	1.38	0.64	0.14	0.13	0.97	0.46	0.12	0.09
15.5	2.90	1.36	0.28	0.31	2.92	1.44	0.31	0.29	2.44	1.09	0.29	0.28
22.5	4.65	2.32	0.49	0.53	4.33	2.31	0.41	0.44	3.75	1.65	0.49	0.41
30	5.92	3.03	0.67	0.64	5.62	3.20	0.59	0.63	4.82	2.07	0.68	0.56
37.5	7.38	4.03	0.74	0.87	7.17	4.36	0.77	0.87	6.95	2.88	0.74	0.76
45	9.05	4.79	1.07	1.06	8.48	4.71	1.06	1.29	7.79	4.01	0.78	1

1~2milisec. 후에 감쇠된다.

(1) 충격량

실험결과 구의 입사각에 따른 충격량 $\int Fdt$ 의 값은 Table 2에 나와 있으며, $\beta = \int Fdt / 2mv$ 의 평균값들은 아래와 같고, 여기서 볼때 이 측정장치의 신호전달성은 충격력 측정에 유효하다 하겠다.

- 경 강 : $\beta = 0.900$
- 연 강 : $\beta = 0.950$
- 황 동 : $\beta = 0.950$

앞의 Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 transducer C의 응답치는 transducer A의 50%이며, transducer A와 수직방향의 위치에 있는 transducer B와 D는 transducer A의 10~15% 정도의 크기이다.

(2) 충격시간 및 감쇠비

구의 종류에 따른 force transducer A와 C에서 측정한 충격시간의 크기에 대한 대략적인 값은 다음과 같다.

- 경 강 : transducer A - 160~150 μ sec.
transducer C - 130~110 μ sec.
- 연 강 : transducer A - 200~175 μ sec.
transducer C - 200~135 μ sec.
- 황 동 : transducer A - 215~185 μ sec.
transducer C - 200~175 μ sec.

충격시간은 황동구가 경강이나 연강과 같은 강철구보다 더 길며, 강철구 중에서 연강구가 경강구보다 더 길다. 그리고 transducer 관점에서 보면 충격시간은 transducer C보다 충격을 직접 받는 transducer A가 더 길다.

Logarithm decrease 계산방법에 의해 Fig. 8로부터 감쇠비가 5~6%임을 알 수 있었다.

4.3 Central Ring내벽 충격실험

실험결과 황동구에 의한 입사각이 22.5°인 경우의 측정시간범위 1.5milisec.인 응답곡선은 Fig. 10에서 볼 수 있는 바와 같이 4개의 transducer사이의 시간차는 존재하지 않는데, 이것은 충격시 central ring에 의해서 응답이 동시에 발생한다는 것을 의미하며, 그리고 이 응답곡선으로부터 충격되는 방향으로 transducer가 2개씩 대칭적으로 움직인다는 것을 알 수 있다.

충격시 신호의 극성은 transducer A와 B의 경우 인장력을 나타내며, transducer C와 D의 경우 압축력을 나타낸다. 충격이 발생하고난 후 sine감쇠파가 발생하는데, 위상은 transducer A와 C가 서로 반대이고, transducer B와 D가 서로 반대이다. 이들결과는 2차 mode인 인장, 압축의 움직임에 따르는 직

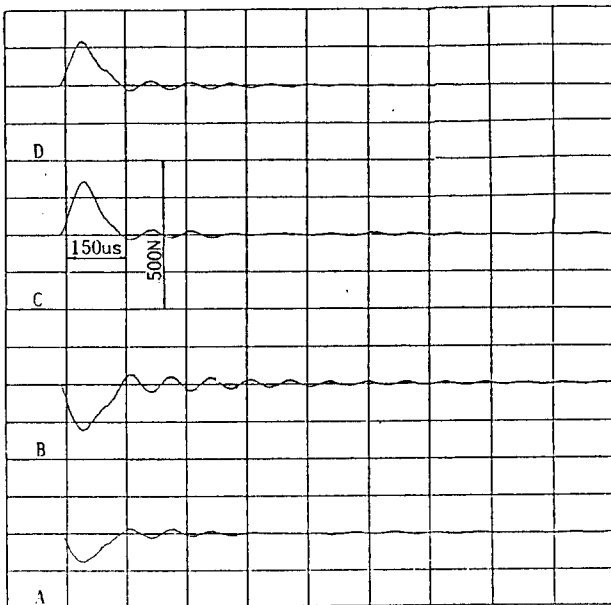


Fig. 10 Typical response of central ring inside impact test when bronze ball is dropped with an incidence angle of 22.5° (1.5milisec. range)

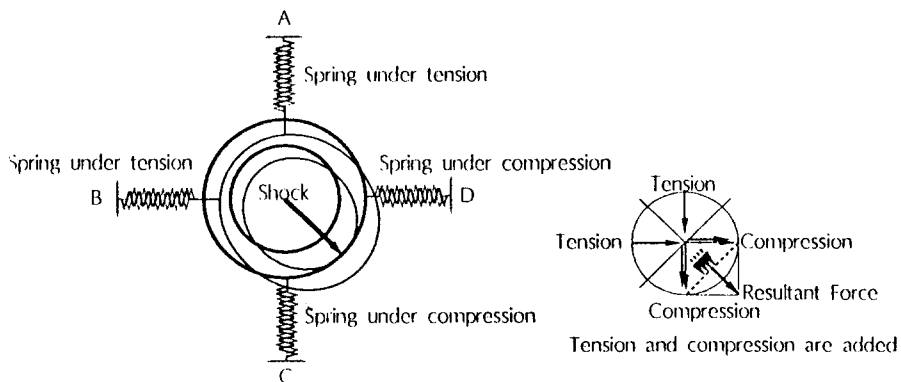


Fig. 11 Force Transducer Assembly behavior when impact is applied to central ring inside with an angle of 45°

교mode의 특징을 갖고 있다. 충격 후나 충격시 central ring은 변형되는데, 즉 이것은 타원형으로 변형되면서 충격방향의 측(lateral)방향으로 변위가 발생하며, transducer C와 D는 압축되고, 동시에 A와 B는 인장된다. 이때 발생하는 인장 및 압축력은 Fig. 11과 같이 더해진다. 충격 후 충격력측정장치는 약 1.5milisec. 동안 감쇠된다.

실험결과로부터 central ring의 고유진동수를 계산 결과와 비교해 보면다음과 같다. :

Fig. 12처럼 central ring이 변형된다고 가정하면, 이때 mode는 2차 mode이다. 따라서, R.D.Blevins의 공식으로 부터⁽⁸⁾

$$f = \frac{i^2 \pi^2}{2\pi(R\alpha_0)^2} \sqrt{\frac{[1 - (\frac{\alpha_0}{i\pi})^2]^2}{1 + 3(\frac{\alpha_0}{i\pi})^2}} \frac{EI}{m}$$

여기서, mode=2 이므로 $i=2$ 를 대입하고, $I = bh^3/12 * 4 = 2.047 * 10^{-10}$, $\alpha_0 = \pi/2$, $R = 10^{-2}m$ 이므로, $f = 8615Hz$ 를 얻을 수 있다. 그리고, 실험으로 부터 경강구인 경우의 주파수를 살펴보면,

- Transducer A에 충격을 가할 경우 : $f = 7830Hz$
- 45°로 central ring에 충격을 가할 경우 : $f = 9400 \& 9800Hz$

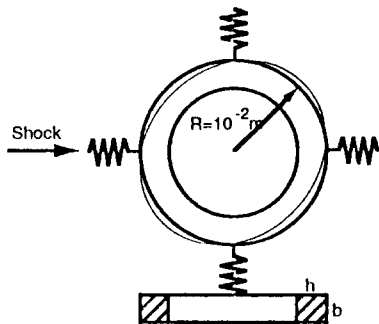


Fig. 12 Assumed central ring deflection shape

이다. 따라서 위의 결과로 부터 충격력측정장치의 실험과 계산에 의한 주파수 값이 일치하고 있음을 알 수 있다.

(1) 충격량

실험결과 입사각에 따른 충격량 $\int Fdt$ 의 값은 Table 3과 같고, 또한 $\beta = \sum(\int Fdt/2mv)$ 에 대한 평균값은 다음과 같다.

- 경 강 : $\beta = 0.746$
- 연 강 : $\beta = 0.772$
- 황 동 : $\beta = 0.763$

(2) 충격시간 및 감쇠비

구의 입사각에 따른 충격시간의 대략적인 값은 다음과 같다.

- 경 강 : 135~155 μ sec.
- 연 강 : 140 또는 145~160 μ sec.
- 황 동 : 150 또는 155~190 μ sec.

이 결과에서 볼때 충격시간의 크기는 황동구, 연강구, 경강구의 순이다.

Logarithm decrease방법에 의해 황동구에 의한 충격실험결과인 Fig. 10으로 부터 감쇠비가 대략 5%임을 알 수 있다.

(3) 계산치와의 비교

부록에 따라 시간 t 에 대해 0부터 ∞ 까지 실험응답치를 분석해보면

$$k \int_0^{\infty} x(t) dt = 2mv \left(1 + \frac{8\xi e^{\pi\xi}}{\pi^2(1+\xi^2)} \right)$$

과 같이 나타낼 수 있는데, 위의 식에서

첫번째항 $2mv$ 는 충격량에 해당하고, 두번째항 $2mv(8\xi e^{-\pi\xi}/\pi^2(1+\xi^2))$ 은 응답신호의 sine감쇠파에 해당한다.

Table 3 Impact force in case of central ring inside impact test (* 10^{-2} has to be multiplied to all below values)

Incid. Angle (°)	Bronze ball				Mild steel ball				Hard steel ball			
	$\int Fdt (N \times sec.)$				$\int Fdt (N \times sec.)$				$\int Fdt (N \times sec.)$			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
7.5	0.37	0.39	0.37	0.41	0.19	0.29	0.44	0.48	0.32	0.44	0.41	0.34
15.5	0.71	0.75	0.79	0.9	0.35	0.54	0.86	1	0.49	1.06	1.02	0.81
22.5	1.04	1.13	1.23	1.42	0.45	0.77	1.36	1.63	0.7	0.98	1.57	1.09
30	1.21	1.4	1.72	2.07	0.51	1	1.75	2.19	0.67	1.46	2.35	1.68
37.5	1.43	1.71	1.85	2.3	1.5	1.72	2.51	2.8	0.35	1.46	2.74	2.5
45	1.72	2.23	2.7	3.37	2.06	2.21	2.91	3.22	0.28	1.26	3.25	3.95

응답신호의 충격량에 대한 적분은 약 1.5milisec. 동안의 전체 적분과 같다. 이것은 실험결과인 Table 3에서 볼 수 있는 바와 같이 전체신호와 충격량신호 거의 같다는 사실과 일치하고 있다. 그밖에 실험상의 감쇠비 $\xi=6\%$ 를 뒀수식의 두번째항 ($8\xi e^{-\pi\xi}/\pi^2(1+\xi^2)$)에 대입하면 0.04=4%를 찾을 수 있으므로 이 부록의 계산식에 대한 타당성을 보여 줄 수 있다.

4.4 Cylinder에 의한 충격실험

Cylinder를 충격력측정장치에 추가로 설치하여 충격실험을 수행한 결과의 응답신호는 Fig. 13과 같으며, 각 transducer별 충격신호에 대한 분석은 다음

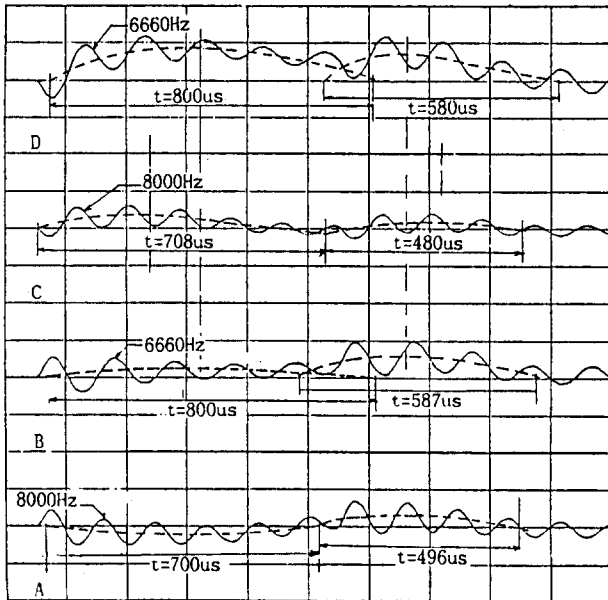


Fig. 13 Typical response of cylinder impact test when hard steel ball is dropped with an incidence angle of 37.5° (1.5milisec. range)

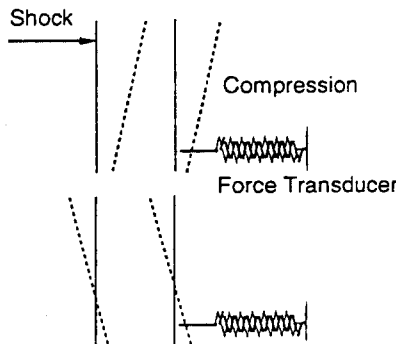


Fig. 14 Cylinder behaviour after impact is applied to upper part

과 같다. :

Transducer D : Force transducer의 압축에 해당되는 두 개의 파가 혼합되어 있는 형태로써, Fig. 13에서 볼 수 있는 바와 같이 첫번째 파의 주기는 $2 \times 800\mu\text{sec}$ 이며 이것의 주파수는 625Hz이다. 두번째 파의 주기는 $2 \times 580\mu\text{sec}$ 로써 이것의 주파수는 860Hz이다. 이 두파를 합성하면 이 신호의 전체 주파수는 6660Hz이며, 이 신호는 첫번째 신호에서 감쇠되어 두번째 신호의 시작시 다시 확대된다. 이 신호로부터 transducer D의 움직임은 다음과 같이 생각될 수 있다. 즉 Fig. 14에서 볼 수 있는 바와 같이 첫번째파에서는 force transducer의 압축시 cylinder는 병진회전운동을 하게되며, 두번째파에서는 cylinder가 원래 자리로 잡아당겨지고, force transducer가 축이 되어 다시 압축된다.

Transducer C : Force transducer D와 같으나 단지, transducer C의 신호가 transducer D의 신호보다 약하다. (C/D의 비는 0.4이다). 충격은 따라서 두 transducer C와 D사이의 비에 따라 대칭적이지 않으며, 압축파의 최대값사이에는 시간의 간격이 존재한다. 이 신호의 첫번째파의 주기는 708μsec이며, 두번째파의 주기는 480μsec이다. 이 두파의 합성된 전체 주파수는 8000Hz로 측정되었다.

Transducer B : Force transducer C와 D의 신호와 같은 형태이며, 신호는 6660Hz로 측정되고, transducer D의 신호와 반대 위상을 갖고 있음을 알 수 있다.

Transducer A : 첫번째파는 transducer의 인장에 해당되고 두번째 파는 압축에 해당된다. 이 신호는 8000Hz로 측정이 되며, transducer C의 신호에 대해 반대 위상을 갖고 있다.

충격력 측정장치의 6660Hz와 8000Hz에서의 움직임을 살펴보면 이들은 $n=2$ 의 mode에서 서로 직교하고 있으며, 6660Hz는 DB방향으로 움직이며, 8000Hz는 CA방향으로 움직인다. Cylinder가 없는 경우와 있는 경우를 비교해보면, 있는 경우가 주파수에 있어서 더 작은 값, 즉, cylinder가 없는 경우의 9400Hz와 9800Hz 대신에 6660Hz와 8000Hz의 값을 갖는데, 이것은 cylinder에 의한 질량증가가 K/M의 비를 감소시키기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 튜브의 마모손상평가를 위한 1차적 요구사항인 튜브와 지지대사이의 동적 상호작용분석

을 위해 충격력 측정장치를 개발, 이 장치에 의한 실험을 제안하였으며, 이 장치의 특성실험을 통해 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. :

(1) 충격력 측정장치의 충격특성은 구의 움직임 $2mv$ 와 충격량 $\int Fdt$ 의 비인 계수 β 에 의해 결정되고, 이것은 가해지는 충격량의 함수이며, 충격력 측정장치의 주요부품들은 이와 똑같은 경향을 갖는다. 참고로 외력을 가했을 때 Force Transducer Assembly 전체의 β 값은 0.9~0.95이고, central ring의 β 값은 0.75정도로서, 이 장치의 신호전달성면에서 볼 때 충격량 측정에 적절하다고 할 수 있다.

(2) 응답신호의 형태는 사용한 구의 재질특성에 따라 다르다. 즉, 충격시간의 관점에서 보면 황동구의 충격시간이 제일 길고, 충격크기에 대해서는 강철구(경강구, 연강구)보다 황동구가 약하다.

(3) 충격력 측정장치의 Blevins 공식에 의해 계산된 8000Hz에서의 움직임은 central ring이 mode 2에서 계란모양의 타원형으로 변형되는 것을 의미한다.

(4) Cylinder에 의한 충격실험은 충격력 측정장치의 주파수 감소를 가져온다.

(5) 튜브와 지지대사이의 동적 상호 충격실험을 위해서 이 충격력 측정장치에 직접 충격을 가하거나 가진기에 의한 충격실험이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Blevins, R.D., 1990, Flow-induced vibration, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold.
- (2) Pettigrew, M.J., Carlucci, L.N., Taylor, C.E. and Fisher, N.J., 1991, "Flow-induced vibration and related technologies in nuclear components," Nuclear Engineering and Design, Vol.131, pp.81~100.
- (3) Ko, P.L., 1979, "Experimental Studies of Tube Frettings in Steam Generators and Heat Exchangers," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.101, Transactions of ASME, pp.125~133.
- (4) Axisa, F., Desseaux, A. and Gibert, R.J., 1984, "Experimental Study of Tube-Support Impact Forces in Multi-span PWR Steam Generator Tubes," Vibration in Heat Exchanger Tubes, The ASME Winter Annual Meeting, Vol.3, pp.139~148
- (5) Shin, Y.S., Sass, D.E., and Jendzejczyk, J.A.,

1978, "Vibro-impact Responses of a Tube with Tube-Baffle Interaction," Argonne National Laboratory, ANL-CT-78-11

- (6) Rogers, R.J., Pick, R.J., 1978, "On the Dynamic Spatial response of a Heat Exchanger Tube with Intermittent Baffle Contacts," Nuclear Engineering and Design 36, pp.81~90
- (7) Fisher, N.J., Ingham, B., 1988, "Measurement of Tube-to-Support Dynamic Forces in Fretting-Wear Rigs," Flow-Induced Vibration in Heat-Transfer Equipment-Vol.5, The American Society of Mechanical Engineers, pp.137~156.
- (8) Blevins, R.D., 1979, "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape," Van Nostrand Reinhold Comp., p.207.

부 록

충격력 측정장치의 **Harmonic oscillation** 응답에 대한 이론적 계산

충격력 측정장치는 조화 감쇠를 갖는 진동체로써 Fig. A1와 같이 모델링 할 수 있다. 즉, 질량 M , stiffness K (= $1/2 \times$ 한 개의 측정장치 stiffness)를 갖는 계라고 하면, 이 진동계는 다음과 같이 나타낼 수 있다. :

감쇠는 Viscous 감쇠로써

$$\xi = \frac{C}{2M\omega_0}$$

이고, 이때의 박동(pulsation) 주파수는 다음과 같다.

$$\omega_0^2 = \frac{K}{M}$$

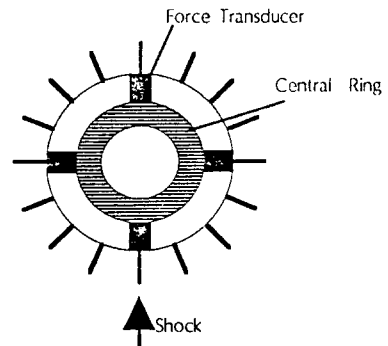


Fig. A1 Harmonic oscillation model of Force Transducer Assembly

1. 충격량 mv 에 대한 응답

변형되지 않는 central ring의 변위 $X(t)$ 는 Fig. A2에서

$$X(t) = \frac{mv}{M\omega_0} e^{-\xi\omega_0 t} \sin\omega_0 t$$

여기서, $X(t)$: 충격력 c_1 및 c_2 하의 측정장치 인장 및 압축하에서의 변형 (Fig. A1참조)

이다. 따라서, c_1 및 c_2 임에 의한 신호는 다음과 같다.

$$F(t) = KX(t) = mv\omega_0 e^{-\xi\omega_0 t} \sin\omega_0 t$$

(1) 최대값 계산

Fig. A3에 의해 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, $\omega_0\tau = \frac{2\pi}{T} \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2}$ 이고,

또한 만일 $\xi\omega_0\tau = \xi\frac{\pi}{2} \ll 1$ 이며, $t = \tau = \pi/2\omega_0$ 에서 $F_{max} = mv\omega_0$ 가 된다. 그리고, $F(t)$ 의 첫번째 pulse의 시간은 다음과 같다.

$$\Delta\tau = 2\tau = \frac{\pi}{\omega_0} \tag{1}$$

㉓ $\Delta\tau$ 동안의 대략적인 적분을 할 경우

만일 신호가 Fig. A4와 같이 대칭적이라면,

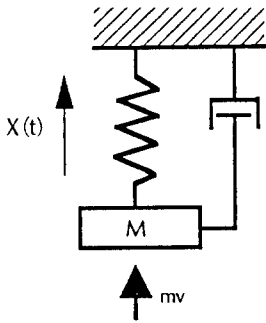


Fig. A2 Simplified model of Force Transducer Assembly

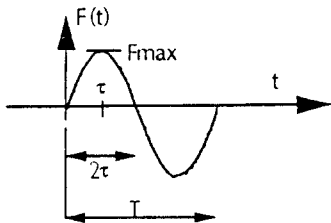


Fig. A3 Typical harmonic response

$$F = F_{max} \frac{\Delta\tau}{2}$$

과 같고, 따라서 위의 식(1)로부터

$$F = mv\omega_0 \frac{\pi}{2\omega_0} = \frac{\pi}{2} mv = 1.57mv = 1.57P$$

과 같다. 여기에서 구에의한 충격이 탄성적인 충격이라고 가정하면 다음과 같다.

$$P = 2mv \tag{2}$$

이때 m : 구의 질량

㉔ 정확한 적분을 할 경우

$$F = \int_0^t F(t) dt = 2mv\omega_0 \int_0^t \sin\omega_0 t e^{-\xi\omega_0 t} dt = \left[-\frac{2mv}{1+\xi^2} e^{-\xi\omega_0 t} (\xi\sin\omega_0 t + \cos\omega_0 t) \right]_0^t$$

여기서, sine파의 첫번째 주기 $t = \pi$ 까지의 적분은

$$F = \frac{2mv}{1+\xi^2} (1 + e^{-\xi\omega_0 t})$$

이다. 만일 $\xi \ll 1$ 이라면, $F(\Delta\tau) = 4mv$ 이고,

$t = \infty$ 이면 $F(\Delta\tau) \rightarrow F(t) = 2mv$ 이다. $\tag{3}$

2. 최종충격시간 동안의 계의 응답

외력 $F(t)$ 를 받는 진동계의 지배방정식은

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F(t)$$

이다. 이 계가 초기에는 정지해 있다고 한다면 변위 X 의 Laplace 변환은

$$X(p) = \frac{F(p)}{M(p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2)}$$

이때, $\omega_0^2 = K/M$, $\xi = C/2M\omega_0$

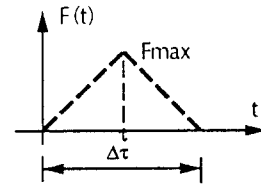


Fig. A4 Approximate impact response

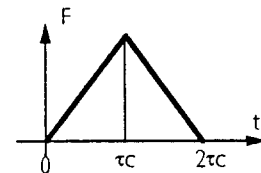


Fig. A5 Assumed impact response at the end of impact

이다. 만일 진동계의 충격이 충격시간 $2\tau_c$ (Fig. A5참조)의 삼각형 형태이라면

$$F(p) = \frac{F}{\tau_c p^2} (1 - e^{\tau_c p})^2 \text{ 또는}$$

$$X(p) = \frac{\frac{F}{\tau_c p^2} (1 - e^{\tau_c p})^2}{M(\omega_0^2 + p^2 + 2p\xi\omega_0)}$$

과 같이 얻을 수 있다. 이 조건하에서 계의 응답은 다음과 같다.

$$X(t) = A[\omega_0 t - \sin\omega_0 t] \quad \text{for } 0 \leq t \leq \tau_c \quad (4)$$

$$X(t) = A[\omega_0(2\tau_c - t) - \sin\omega_0 t + 2\sin\omega_0(t - \tau_c)] \quad \text{for } \tau_c \leq t \leq 2\tau_c \quad (5)$$

$$X(t) = A[2\sin\omega_0(t - \tau_c) - \sin\omega_0(t - 2\tau_c)]$$

$$-\sin\omega_0 t] \quad \text{for } t > 2\tau_c$$

이 계가 감쇠한다면, $X(t)$ 는 $t > 2\tau_c$ 에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$X(t) = A[2\sin\omega_0(t - \tau_c) - \sin\omega_0(t - 2\tau_c) - \sin\omega_0 t] e^{-\xi\omega_0 t} \quad (6)$$

식 (4), (5) 및 (6)을 적분하고, $F \times \tau_c = 2mv$ 와 $\tau_c = \pi/\omega_0$ 에 대해 이 (4), (5), (6)을 각각 적분한 결과를 합치면

$$\frac{2mv}{K} \left(1 + \frac{8\xi e^{-\pi\xi}}{\pi^2(1+\xi^2)} \right) \quad (7)$$

과 같이된다.