

S/R 밸브에서 격막의 곡률반경과 재료가 밸브 개구시간에 미치는 영향

전흥균[†] · 황재군* · 조태석* · 권영두** · 권순범***

The Effect of Curvature Radius and Material of Diaphragm on the Valve Opening Time in Diaphragm Type S/R Valve

Heung-Kyun CHEON, Jae-Gun HWANG, Tae-Seok CHO, Young-Doo KWON
and Soon-Bum KWON

Key Words: Compression wave(압축파), Diaphragm(격막), S/R Valve(S/R 밸브), Shock wave(충격파), Valve Opening Time(밸브 개구 시간).

Abstract

When the pressure at the weak spot established at a certain part of a high pressure vessel or piping system exceeds a design pressure, this weak spot is burst, and the pressurized gas emitted through the weak spot will cause a compression wave system. In this connection, in the present study, an experimental study by using a conventional shock tube facility is performed to estimate the effects of the material of diaphragm, curvature radius and thickness of materials on the valve opening time in diaphragm. Pressure sensor having 500kHz in natural frequency is installed at 35mm downstream of the rupture diaphragm to measure the static pressure history of propagating and being accumulated compression wave. 4 kinds of materials are used as diaphragm that is aluminium, copper, stainless steel and zinc. The diaphragm radii of curvature R are ∞ , 120mm and 60, respectively. And the depth for 90° groove is 0.04mm. It is found that the smaller the tensile strength and elongation of the rupture diaphragm is, the smaller the radius of curvature of the rupture diaphragm is, and for the same conditions the thinner the thickness of the rupture diaphragm is, the shorter the valve opening time becomes. Also, the tensile strength, elongation and the radius of curvature of the rupture diaphragm for the same conditions are smaller, the maximum pressure rise caused by the coalescences of the compression wave is smaller. Finally the pressure ratio is higher, the valve opening time is shortened and gradient of pressure increment is more steepen.

기호설명

그리스 문자

P : 측정 압력 (kPa)
 R : 곡률 반경 (mm)
 t_d : 격막의 두께 (mm)
 t_{gr} : 홈의 깊이 (mm)
 $dP/d\tau_{op}$: 압력 증가율
 h : 격막의 높이 (mm)

σ_B : 격막의 허용 응력 (N/m^2)
 τ_{op} : 밸브 개구시간 (sec)

1. 서 론

산업에서 작업의 효율성과 장비의 활용성을 높이기 위해 고압의 다양한 작동 유체를 이용하는 경우가 빈번해지고 있다. 이와 같이 고압의 작동 유체를 사용하는 경우에 있어서 고압으로 인한 위험 때문에 고압 밀폐 용기 혹은 고압 배관에 미리 취약 부분(Weak spot)을 가진 장치를 설치하여

[†] 회원, 대구보건대학 소방안전과
E-mail : sbkwon@knu.ac.kr
TEL : (053)950-5578 FAX : (053)950-6550
* 경북대학교 대학원 기계공학과
** 경북대학교 기계공학과
*** 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학과

안전을 도모하는 방법이 다양하게 사용되고 있다. 이 취약 부분은 내압이 설정 압력 이상으로 될 때 파괴되어 고압의 가스가 방출되고, 다른 부분은 보호되는 S/R 밸브(Safety and relief valve)의 역할을 하게 된다. 이런 종류의 S/R 밸브는 정확한 설정 압력에서 작동되고 그 응답성 또한 빠른 특징이 있다. Disc형의 이 취약 부분에 형상, 치수, 압력, 온도 등의 조건을 준 것을 Rupture disc(이하 RD라 칭함)⁽¹⁾ 또는 격막(Diaphragm)이라 한다.

안전밸브에는 여러 종류가 있지만 RD unit은 완전 밀봉이 가능하며, 가연성, 유독성, 고가의 가스 혹은 방사성 유체의 누수에 따른 위험 또는 낭비를 방지하는 것에 매우 효과적이다. 이러한 이유로 RD unit은 일반적으로 고가의 안전밸브로 널리 사용되고 있다^{(2),(3)}.

한편, RD unit을 고압 압력 용기용 S/R 밸브로 사용하는 경우, 설정 압력보다 높게 되어 격막이 파막되면 격막의 하류에는 압축파(Compression wave)가 발생하고, RD unit의 파편 비산에 의한 위험을 줄이기 위해 사용하는 관의 길이가 어느 임계치보다 길게 되면 발생한 이 압축파의 집적에 의해 충격파(Shock wave)가 발생되기도 한다⁽⁵⁾. 이 압축파의 집적인 충격파가 발생되면, 충격파의 비가역성(Irreversibility)에 의한 다양한 위험이 뒤따르게 된다.

따라서 RD unit에서 사용한 격막 하류의 관에 있어서 격막의 파막에 따른 충격파의 발생문제에 미치는 격막의 제 요소의 영향을 밝히는 것은 대단히 중요한 문제로 된다. 특히 격막 하류 배관에서의 충격파의 형성에 필요한 거리는 RD unit을 선택할 때, 매우 중요한 인자 중의 하나이다.

충격파의 형성거리(Shock formation distance)는 diaphragm(즉, 안전밸브)의 개구시간(Opening time)의 영향을 크게 받는다고 알려져 있으며, 이와 관련하여 이전의 여러 연구자들은 격막 개구 시간과 충격파 형성거리의 관계를 해석적 및 실험적 방법으로부터 구명하고자 노력하였다.

이와 관련한 종래의 연구들을 살펴보면, Matsuo 등⁽⁶⁾은 격막 개구시간과 관련하여 차원 해석을 하고, 압력 비(Pressure ratio)에 따른 충격파 형성 거리를 구하였다. Oda 등⁽⁶⁾은 곡률 반경(Radius of curvature)이 무한대인(즉, 평면형 격막) 격막의 개구 시간과 충격파의 형성 거리를 밝혔으며, PSI 팀⁽⁷⁾은 수중에서 충격파를 발생시키고 그 충격파

에 의한 격막의 개구 시간을 측정한 바 있다. Park 등⁽⁸⁾은 격막의 곡률 반경 또는 홈(Groove)의 형상 및 깊이가 격막의 개구 시간 및 충격파의 형성거리에 미치는 영향을 구명하였다.

그러나 지금까지 밸브의 개구 시간과 충격파의 형성거리에 대한 많은 연구가 진행되었지만, 대부분의 연구는 격막 곡률 반경이 무한대인 경우로 국한되었을 뿐만 아니라 격막의 재료에 대한 연구는 전혀 되어 있지 않은 실정이다.

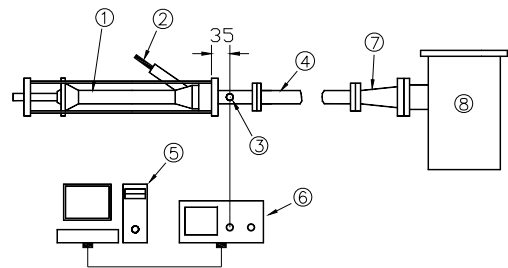
이와 관련, 본 연구에서는 격막의 재료 및 곡률 반경, 홈의 유무 및 깊이 등이 격막의 개구 시간 및 하류 배관에서의 압력 상승 형태에 미치는 영향을 구명하는 것을 연구의 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 측정부(Test section)

RD unit에 있어서 격막 재료와 압력 비, 곡률 반경 등이 S/R 밸브 하류 유동 및 밸브 개구 시간에 미치는 영향을 구명하기 위하여 본 연구에서는 재래의 충격파 관(Conventional shock tube)을 적당히 개조하여 사용하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 재래의 충격파관과 계측 장치의 개략을 나타낸 것이다. 고압의 압력 용기(High-pressure vessel)에 해당되는 충격파관 고압 실은 내경이 100mm이고 길이가 1.5m인 원형 관으로 되어있다. 또 RD unit이 작동하는 경우, 발생하는 격막 파편의 비산으로부터 안전을 도모하기 위해 장착된 밸브 하부 관에 대응되는 충격파관 저압실은 직경이 54mm인 알루미늄 관으로 되어있다. 본 실험의 대상인 격



- ① High-pressure chamber
- ② Needle
- ③ Pressure transducer
- ④ Test section
- ⑤ Personal computer
- ⑥ Oscilloscope
- ⑦ Diffuser
- ⑧ Dump tank

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

막 재료로는 4가지 종류의 소재를 사용하였으며 각 재료에 대해 소정의 곡률 반경 및 홈을 형성하여 격막부에 설치한 후 실험을 수행하였다.

2.2.2 격침(Needle)

격막을 파막시킬 때 사용한 격침의 개략을 Fig. 2에 나타내었다. 압력 용기에 해당되는 고압실과 용기 바깥에 대응되는 저압실에 소정의 압력을 채운 후 격침에 의해 강제 파막시켜 격막의 파막 시간을 구하였다.

격침은 공압 실린더에 의해 작동되고, 재질은 SUS430계열의 스테인리스 스틸 봉이다. 사용에 따른 격침의 마모를 가능한 한 줄이기 위해 격침은 열처리 가공하여 경도를 높였다.

본 연구에 사용된 격막의 곡률 반경은 3 종류 ($R=60, 120, \infty$)이다. 격막의 곡률 반경의 변화에 따른 파막 직전 격침의 선단과 격막 중심까지의 높이(h)가 서로 다르게 된다. 이에 따른 것을 보정하기 위해 Fig. 2에 보이는 바와 같은 3 종류의 격침 시스템을 별도로 제작하여 사용하였다.

2.2.3 격막(Diaphragm)

본 실험에서 사용된 실험 격막 시편은 1050계열의 알루미늄, 5201계열의 적동, 304계열의 스테인리스 강 및 아연합금 판으로 4종이며, 사용된 곡률 반경은 각각 $R=\infty, 120, 60\text{mm}$ 이다. 여기서

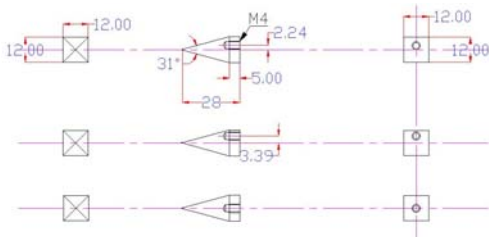


Fig. 2 Schematics of needles

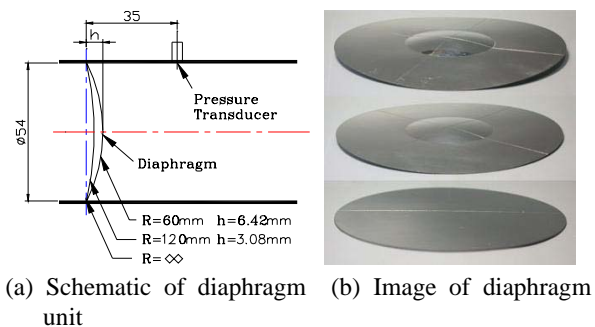


Fig. 3 Specifications and photos of diaphragm

$R=\infty$ 는 격막에 곡률반경이 없는 평판인 경우이며, 격막의 곡률은 자체 제작한 금형을 이용하여 제작하였다.

Fig. 3은 설치된 격막의 개략과 곡률 반경에 따른 형상을 간략히 나타낸 것이다. Fig. 3(a)에서 R 은 격막의 곡률 반경이며, h 는 격막을 격막부에 설치했을 때 곡률 반경에 따른 격막 설치 위치로부터 격막 접촉점(Piercing point)까지의 높이이다. Fig. 3(b)는 각 곡률 반경에 대한 격막의 실물을 나타낸 사진이다.

격막은 Water jet 가공에 의해서 원판으로 가공되었고, 가공 오차가 $\pm 1/1,000\text{mm}$ 인 NC밀링 머신을 사용하여 홈 가공을 하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 압력 측정

격막이 파막된 후, 밸브의 하류 유동에 크게 영향을 끼치는 격막의 압력 이력(Pressure history)을 측정하기 위해서 원형 알루미늄 관의 35mm 지점에 압력 센서(Pressure transducer)를 설치하여 압력 변동이 심한 정압을 측정하였고, 이를 위해 고유 진동수(Natural frequency)가 500kHz인 고성능 압력 센서(XTE-190-50G)를 사용하였다.

또한, 압력 센서로부터 얻어진 mV 값의 데이터는 오실로스코프와 컴퓨터 간의 RS-232 port를 이용하여 컴퓨터로 전송된 후 저장되고, 오실로스코프로부터 얻어진 데이터를 해석하는 프로그램인 [Waveform]을 사용하여 신호의 형태와 상승 시간, 최대값 등을 분석함으로써 충격파의 형성 거리 및 밸브 개구 시간 등을 구하였다.

압력을 측정할 때 발생하는 외부로부터의 소음(Noise)를 줄이기 위해서 압력 센서의 연결 단자를 알루미늄 박판으로 감쌌고, 전원 공급 장치(Power supplier)의 고유 노이즈로 인한 실험값의

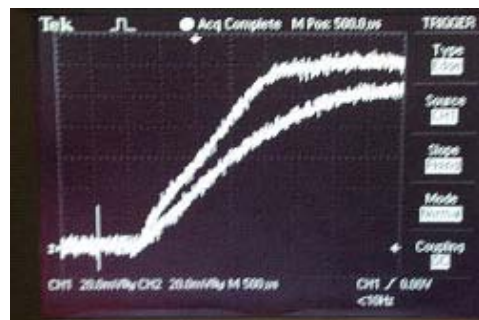


Fig. 4 Typical signal from oscilloscope

오차를 줄이기 위해서 압력 센서의 전원을 화학 전지(10volts)로 하였다.

Fig. 4는 오실로스코프에 나타난 실제의 압력 시그널을 나타낸 것이다. 이 경우 밸브 개구 시간 결정 방법은 Fig. 5에서 설명한다.

본 실험에서는 구동 및 피동 기체(Drive and driven gas)로서 비열비가 1.4인 건공기(Dry air)를 사용하였다.

3. 격막 재료의 기계적 성질

Table 1은 실험에 사용된 각각의 재료와 그 물성치 중에서 밸브의 개구 시간에 영향을 미칠 것으로 판단되는 파단 강도(Tensile strength) 및 연신율(Elongation)을 나타낸 것이다.

실험에 사용된 격막은 현재 시판되고 있는 1050계열의 알루미늄, 5201계열의 적동, 304계열의 스테인리스 스틸 강 및 아연 합금 판의 4종이다.

Table 1에 나타난 바와 같이 파단 강도는 스테인리스 스틸이 가장 크고, 알루미늄이 가장 작았으며, 연신율의 경우는 아연이 가장 높고, 알루미늄이 가장 낮다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 곡률 반경이 없는 경우

4.1.1 격막 재료의 영향(압력차 $\Delta P=900\text{kPa}$)

Fig. 5는 동일한 격막 두께 $t_d=0.3\text{mm}$, 홈 깊이 0.04mm (격막 두께 0.3mm), 곡률 반경 무한대 및 압력비 $P_4/P_1=10$ 즉, $\Delta P=900\text{kPa}$ 인 경우에 대하여, 격막 재료가 밸브 개구 시간에 미치는 영향을 알아보기 위해 4가지 격막 재료에 대한 압력 이력을 나타낸 것이다. 압력 이력은 격막으로부터 RD unit 하류 35mm 지점에 설치된 압력 센서로부터 얻어진 것이다. 위 그림은 압력 센서로부터 직접

Table 1 Properties of Materials

No.	Materials	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
1	Aluminum (1050 계열)	11	25
2	Copper (5201 계열)	28	35
3	Stainless steel (304 계열)	53	39
4	Zinc (Zn-Cu-Ti 합금)	27	43

채집한 데이터를 오실로스코프에 나타낸 결과이고 아래 그림은 분석을 용이하게 하기 위해 위 결과를 Curve fitting하여 나타낸 것이다.

아래 그림 내에 실험을 통해 얻어진 데이터로부터 격막 개구 시간을 알아내는 방법을 도식화하여 나타내었다. 즉, 압력이 급격히 상승되는 위치로부터 이 위치에서의 압력 상승 기울기와 안정화된 후의 기울기의 교점을 격막 개구 시간으로 하였다.

그림에서 알 수 있듯이 재료의 파단 강도와 연신율이 작을수록 격막의 개구 시간은 짧아지고 상승하는 압력도 낮아진다. 이는 동일한 압력차에 대해서 파단 강도 및 연신율이 작은 재료가 작은 힘에 의해서도 격막의 파단이 더 용이하기 때문이다. 아연 판의 경우는 파단 강도는 작지만 연신율이 크기 때문에 밸브가 열리는데 더 오랜 시간이 걸리는 것으로 나타났다.

4.1.2 격막 재료의 영향(압력차 $\Delta P=1,100\text{kPa}$)

Fig. 6은 격막의 두께 $t_d=0.3\text{mm}$ 이고, 홈 깊이 0.04mm , 압력비 $P_4/P_1=12$ 즉, 압력차 $\Delta P=1,100\text{kPa}$

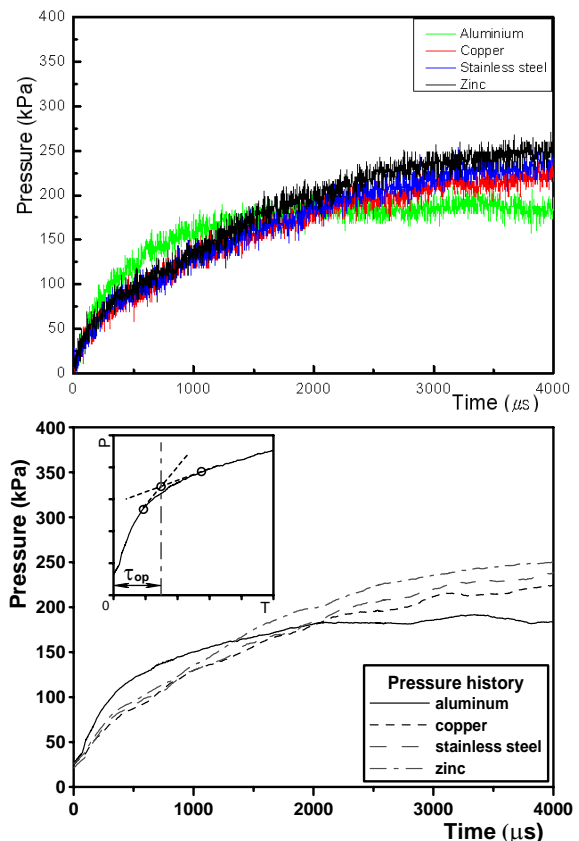


Fig. 5 Pressure histories with the materials for ($t_d=0.3\text{mm}$, $\Delta P=900\text{kPa}$, $t_{gr}=0.04\text{mm}$)

에 있어서, 격막 재료에 따른 압력 이력을 나타낸 것이다.

전술한 Fig. 5의 결과와 동일한 경향으로 각 재료의 파단 강도와 연신율이 작아질수록 밸브의 개구 시간은 짧아지고, 상승하는 최대 압력(Peak pressure)도 작게 되는 것으로 나타났다.

한편 압력차 ΔP 가 1,100kPa인 Fig. 6의 경우가 900kPa인 Fig. 5의 경우보다 동일한 곡률 반경과 격막 두께에 대해 밸브의 개구 시간은 빨라지고 최대 상승 압력의 크기도 큰 것으로 나타났다. 이는 압력차가 클수록 격막에 작용하는 초기 인장 응력이 크게 되기 때문이라 판단된다.

Table 1 및 Fig. 5, 6의 결과로부터 재료의 파단 강도의 감소와 연신율의 감소는 밸브의 개구 시간을 짧게 한다는 결론을 내릴 수 있다.

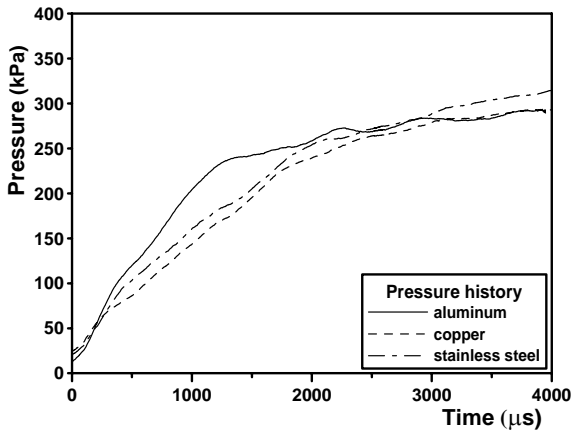


Fig. 6 Pressure histories with the materials ($t_d=0.3\text{mm}$, $\Delta P=1,100\text{kPa}$, $t_{gr}=0.04\text{mm}$)

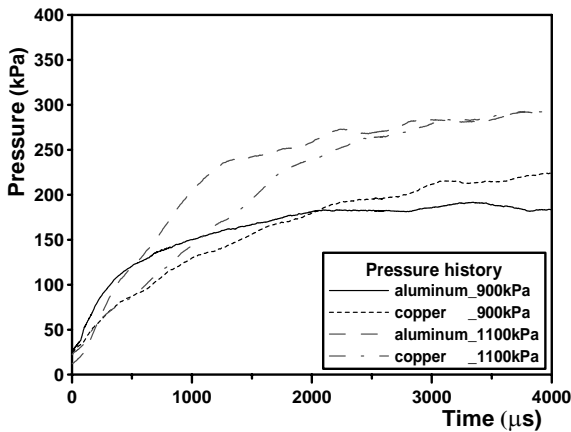


Fig. 7 Pressure histories with the variation of initial pressure difference ($t_d=0.3\text{mm}$, $t_{gr}=0.04\text{mm}$)

4.1.3 압력차의 영향

Fig. 7은 동일한 조건에서 압력차의 영향을 비교하기 위해 나타낸 압력 이력으로서, disc의 재질은 적동과 알루미늄에 대한 것이다. 각각 격막 두께 $t_d=0.3\text{mm}$, 홈 깊이 0.04mm 이며, disc의 곡률 반경은 무한대인 경우에 대한 것이다.

격막 재료에 관계없이 압력차가 큰 1,100kPa의 경우가 900kPa의 경우보다 밸브의 개구 시간은 빠르고 최대 압력상승의 값도 크게 되는 것으로 나타났다.

4.2 곡률 반경이 있는 경우

4.2.1 적동 (5201계열)

Fig. 8은 격막 재료가 5201계열의 적동인 경우, 격막 두께 $t_d=0.3\text{mm}$ 이고, 홈 깊이 0.04mm , 압력차 $\Delta P=900\text{kPa}$ (압력비=10.0)에 있어서, 곡률 반경의

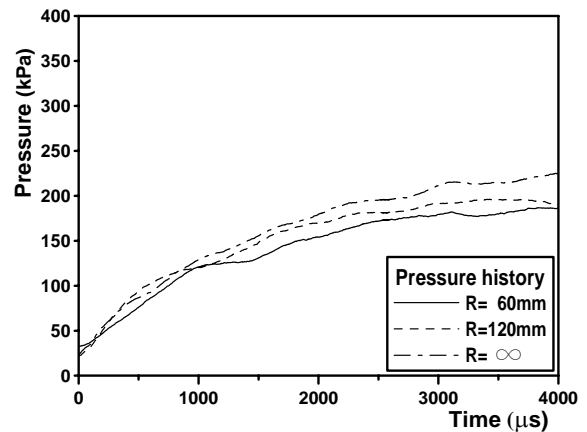


Fig. 8 Pressure histories with the variation of radius of curvature for copper ($t_d=0.3\text{mm}$, $\Delta P=900\text{kPa}$, $t_{gr}=0.04\text{mm}$)

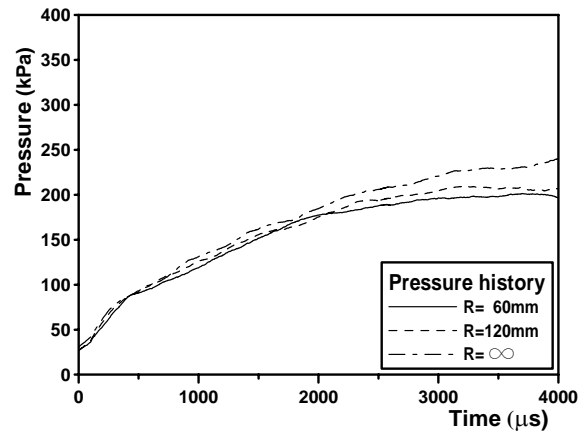


Fig. 9 Pressure histories with the variation of radius of curvature for stainless steel ($t_d=0.3\text{mm}$, $\Delta P=900\text{kPa}$, $t_{gr}=0.04\text{mm}$)

변화에 따른 격막의 개구 시간을 나타낸 것이다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 재료의 곡률 반경이 작아질수록 격막의 개구 시간은 짧아지고 상승하는 압력도 낮아진다. 이는 격막이 파막될 때, 동일한 압력차에 대해서는 허용응력이 작을수록 격막의 중심(파단된 격막 끝단)이 관 벽에 이르는 이동거리가 짧아져(예로서 $R=\infty$ 및 60mm의 경우 각각의 거리는 42.4 및 39.5mm가 됨, Fig. 3) 밸브 개구 시간이 짧아졌다. 또한, 초기 격막 상류의 고압부 내 유체 입자(Particle)로부터 압력 센서가 위치한 곳까지의 거리 차이가 크게 되어 압축파의 집적이 상대적으로 약하게 되기 때문에 최대 압력 상승은 낮게 된 것으로 사료된다.

4.2.2 스테인리스 스틸 (304계열)

Fig. 9은 격막 재료가 304계열의 스테인리스 스틸 강관인 경우, 격막 두께 $t_d=0.3\text{mm}$, 홈 깊이 0.04mm, 압력차 $\Delta P=900\text{kPa}$ (압력비=10.0)에 있어서, 곡률 반경에 따른 격막의 개구 시간을 비교한 것이다.

전술의 Fig. 8의 결과와 같이 격막의 곡률 반경이 작아질수록 개구 시간은 짧아지고, 상승하는 최대 압력도 작게 되는 것으로 나타났다. 또한 압력차를 제외한 나머지 조건이 동일한 경우 압력차가 클수록 상승하는 최대 압력은 크고 격막의 개구에 따른 압력상승의 기울기가 크게 되었다. 이는 압력차가 클수록 격막의 개구 시간이 짧아져서 격막의 하류에서 집적되는 압축파의 강도가 크게 되기 때문이다.

5. 결론

Safety and Relief Valve로 사용되는 RD unit에서 격막 재료 및 그에 따른 곡률 반경, 두께가 밸브 개구 시간에 미치는 영향을 실험적으로 연구한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 격막 재료에 있어서 파단 강도와 연신율이 작을수록 격막의 개구 시간이 빨라지고 압력 상

승은 낮게 되었다.

- 2) 격막의 곡률 반경이 작을수록 격막의 개구 시간은 빨라지고, 상승 하는 최대 압력은 낮게 되는 것으로 나타났다.
- 3) 압력 차 및 압력비가 증가할수록 개구 시간은 짧아지고, 압력 상승은 높게 되었다.

참고문헌

- (1) Pipeline Simulation and Integrity LTD., 2002, "Testing and Analysis of Relief Device Opening Times," Health & Safety Executive, Offshore Technology Report, 023.
- (2) Sharma, V. D., Shyam, R. and Singh, L. P. 1987, "Shock Formation Distance in a Two-Dimensional Steady Supersonic Flow over a Concave Corner in Radiative Magnetogas dynamics," Zeitschrift fuer Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 67, No. 2, pp. 87~92.
- (3) Rothkopf, E. M. and Low, W. 1974, "Diaphragm Opening Process in Shock Tubes," The Physics of Fluids, Vol. 17, No. 6.
- (4) 生井武文 and 松尾一泰, 1968, "衝擊波管の空力特性の關する研究," 日本機械學會論文集, Vol. 34, No. 267, pp. 1961~1968.
- (5) Andrews, D. R., 1983, "The Bursting Diaphragm as a Fast-Acting Valve," Journal of Physics E, Vol. 16, No. 192.
- (6) 大田英輔, "衝擊波管の隔膜の開口に伴う二次元流," 日本機械學會論文集, Vol. 42, No. 355.
- (7) PCI team., de Souza Bianna, A.B. de Sousa Oliveira, J. P. Damion, "The influence of the diaphragm on the metrological characteristics of a shock tube," ENSAM.
- (8) Park, J. M., Cheon, H. K., Kwon, Y. D. and Kwon, S. B., 2006, "Effect of Disc Curvature Radius on Opening Time in S/R Valve," Proceedings of the Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science. Qufu, China, pp. 162~167.