

밸브의 종류 및 선정

3) 제어밸브 (계속)

글 민경화 한국전력기술(주) 원자력사업단 배관기술부

(2) 제어밸브 트림의 종류 및 특성

① 유체조건에 따르는 트림의 선정

트림의 선정에 있어서 사용유체의 물리적 또는 화학적 조건을 다음과 같이 정하여 각 조건에 따른 트림의 종류 및 특성을 고찰한다.

사용유체의 물리적 조건은 압력, 온도, 침식, 유속 등이고 화학적 조건으로는 부식, 금속간 친화력등이지만 실제로는 이 두 조건이 동시에 작용할뿐더러 밸브 주변의 환경적인 요인도 함께 작용되므로 각 조건의 정도에 따라 밸브 트림을 선택한다. 특히 밸브 트림은 내부 밸브 (Inner Valve) 라고 할 정도로 밸브중의 밸브이다. 트림을 구성하고 있는 중요부품으로는 통칭적으로 밸브 좌면 (Seat) 과 좌면에 상대적인 운동으로 밸브의 유류면적을 가변하는 밸브 디스크 (Disk) 로 구성되어 있다. 이 두 요소가 유체의 각 조건에 무리없이 원활한 동작을 위해서는 두 요소의 재질관계뿐만 아니라 형상, 크기등이 각 조건에 따른 설계자의 요구사항에 부합되어야 한다. 이러한 설계자의 요구사항으로는 정확한 유량 제어, 제어 요구 범위내의 차압으로 안정적인 운전, 내부식성, Cavitation 또는 Flashing/Choking등의 불안정한 현상의 극소화등이 있다. 따라서 본 항에서는 유체조건별로 트림 선택의 가이드를 수립하고자 한다. 제어 조건에 따른 트림 선택은 (1) 제어밸브의 유량특성을 참고하기 바란다.

(가) 압력에 따른 트림 선정

고압 밸브인 경우 트림의 구조가 간단할수록 좋다. 특히 트림에서의 차압이 큰 경우 그 사용 조건이 극심하므로 고강도 합금의 트림을 사용한다. 또한 이러한 계통일수록 소음 문제가 크게 대두됨으로 HUSH, 다만 오리피스, Cavitrol, Cascade, Flow Disk Stock, Slotted Cage등 특수 트림이 선택된다.

(나) 온도에 따른 트림 선정

유체의 온도가 높을 때는 밸브 몸체의 열팽창과 밸브 트림의 열팽창간에 차이가 생기게 되는데 일반적인 밸브 트림 재질에서 유체의 온도가 약 450°F (268°C) 정도부터는 주의할 필요가 있다.

따라서 밸브가 정상적으로 운전하기 위해서는 +200°F 정도의 온도차를 유지시켜줄 필요가 있다. 유체의 온도가 600°F (315°C) 를 넘는 경우에는 밸브 케이지를 본네트에 가깝게 설치하여 케이지 아랫면의 열팽창이 자유롭게 하여야 한다.

다음의 <표 5>는 밸브 트림 재질에 따른 온도 한계를 표시한다.

(다) 유속 및 침식에 따른 트림 선정

유량이 많고 차압이 큰 경우에는 밸브 트림에서의 유속이 매우 빠르게 되어 Cavitation/Flashing 및 Choking이 일어나기 쉬우며 이러한 현상에 수반되는 것이 밸브 트림에의 침식이다. 따라서 밸브 트림에서의 유속을 적절히 제어하고 Cavitation과 같은 현상을 피할 수 없는 경우에도 밸브 트림의 수명을 연장시키기 위해서는 트림 재질의 신장은 물론 계통 특성에 맞는 밸브 트림을 선택한다. 예로 그로브 밸브를 앵글 밸브로 바꿔 유속에 대한 저항을 작게하는 방법도 있으나 트림의 형상 및 재질을 개선한 특수 형태의 트림을 선정한다.

전항에서 언급한 Multiple Velocity Headloss Trim, Reduced Flow Velocity Trim, Stepped Holes Cage 및 Cascade Type Multi-orifice등을 채용한 트림등이 고려될 수 있다.

밸브가 정상적으로 운전하기 위해서는
+200°F 정도의 온도차를 유지시켜 준다.

〈표 5〉 밸브의 트림 재질별 사용 온도 한계

MATERIAL	LOWER		UPPER	
	°F	°C	°F	°C
Type304 Stainless Steel	-450	-268	600	316
Type316 Stainless Steel	-450	-268	600	316
Bronze	-460	-273	450	232
Inconel ¹	-400	-240	1200	649
K Monel ¹	-400	-240	900	482
Monel	-400	-240	900	482
Hastelloy B ²			700	371
Hastelloy C ²			1000	538
Titanium			600	316
Nickel	-325	-198	600	316
Alloy 20	-50	-46	600	316
Type416 Stainless 40RC	-20	-29	800	427
CA-6NM	-20	-29	800	427
Nitronic50 ³	-325	-198	1000	538
Type440 Stainless 60RC	-20	-29	800	427
17-4PH (CB-7CU)	-40	-40	800	427
Alloy6 (co-cr)	-460	-273	1500	816
Electroless Nickel Plating	-450	-268	800	427
Chrome Plating	-450	-268	1100	593
Aluminum Bronze	-460	-273	600	316
Nitrile	-40	-40	200	93
Fluoroelastomer (Viton ⁴ and Fluorel ⁵)	-10	-23	400	204
TFE	-450	-268	450	232
Nylon	-100	-73	200	93
Polyethylene	-100	-73	200	93
Neoprene	-40	-40	180	82

1. Trademark of International Nickel Co.

2. Trademark of Stettite Div., Cabot Corp.

3. Trademark of Armco Steel Corp.

4. Trademark of E. I. Dupont Co.

5. Trademark of 3M Co.

② 밸브 트림에 있어서 유체 현상

제어 밸브의 침식 현상을 검토하기 위해서는 밸브 트림에서 유체의 역학관계를 고찰할 필요가 있다. 이는 제어밸브의 교축(Throttling)에서 힘의 변화가 생기게 되는데 이 힘의 변화로 유체계에 상(相: Phase) 변화를 일으켜 제어 계통에 불안정을 가지고 오며 이 과정에서 침식현상을 수반한다. 또한 밸브계에서는 유체의 역학 관계는 밸브 구동부의 크기는 물론 제어 방식의 결정에도 매우 중요한 역할을 한다. 본 항에서는 밸브 트림에서 침식발생의 주요원인을 밸브 트림에서의 유체역학적 관계로 인한 것으로 고려하여 설명한다. 그런데 모든 밸브의 트림은 제어상 용도에 맞도록 서로 상이한 구조를 갖고 있다. 따라서 본 항에서는 제어 밸브의 대표적인 케이지 형식의 그로브 밸브와 색다른 예로서 볼 밸브의 유체 역학적 현상을 검토하고 아울러 고압 펌프의 Mini Flow용 밸브로 사용되는 Cascade형 그로브 밸브와 Flashing Service 용으로 사용되는 하향유로형식의 일반 그로브 밸브의 유체역학적 현상을 고찰하여 본다.

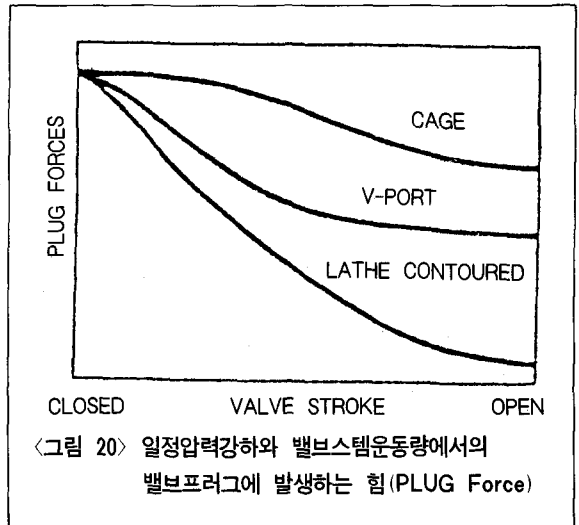
(가) 그로브 케이지 타입(Cage Type) 밸브

케이지 형식 그로브 밸브는 케이지 포트(Port of Cage)로부터 날카롭게 형성된 유로가 프러그면에 충돌 또는 다른 유로와 서로 충돌하면서 밸브 아랫면으로 흐름을 형성하는게 보통이다.

〈그림 16, 17, 18〉과 같이, 유로는 밸브의 좌면(Valve Seat), 또는 좌면 바로 후단에서 Vena-Contracta를 형성하는데 이 지점에서 유체의 유속은 가장 빠르게된다.

이때 유로가 밸브의 케이지와 프러그 사이에서 프러그측으로 형성되면 하향유로(Flow Under)라 하고, 반대로 케이지측으로 형성되면 상향유로(Flow Over)라 한다. 실제로 상향유로일때와 하향유로일때에 밸브 스템에 작용하는 힘은 밸브개도율에 따라 각기 다르지만 대체적으로 미세개도일때 유로방향에 관계없이 가장 큰 힘을 받게되고 개도가 커지면 스템에 작용하는 힘은 점차 감소하는데 하향유로일때가 상향유로에 비하여 작은 힘을 받게된다.

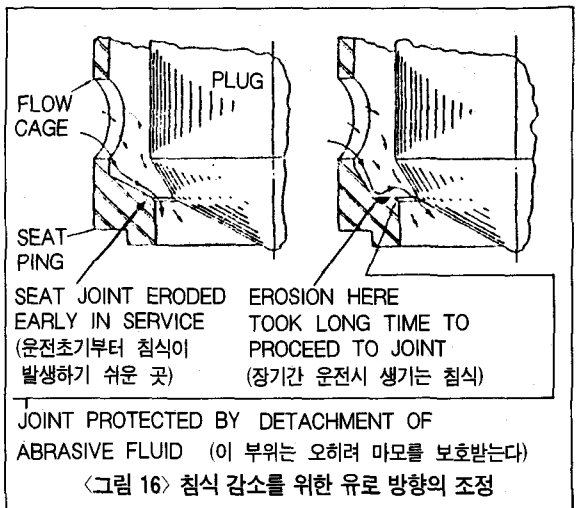
〈그림 20〉은 밸브 프러그의 형식에 따른 프러그 힘(Vena Contracta에서의) 이 밸브개도율에 따라 크게 변화하고 있음을 보여준다.



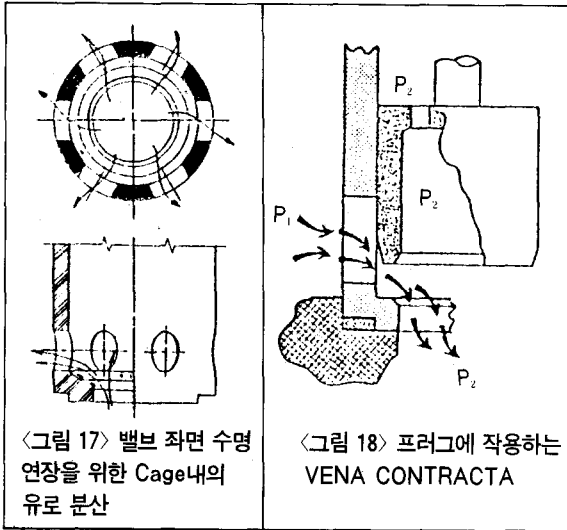
〈그림 20〉 일정압력강하와 밸브스템운동량에서의 밸브프러그에 발생하는 힘(PLUG Force)

따라서 밸브개도가 작을 때는 단위 체적당 에너지가 큰 유체가 고속으로 밸브 좌면에 충돌함으로 밸브 좌면에 침식이 생기게된다.

이러한 침식은 Cavitation에 의한 침식과는 다른 구조로 진행된다고 할 수 있다. 즉 고속의 물분자가 트림 표면에 충돌하여 표면을 전단(Cutting) 시키는 것으로 침식 부위가 일반적으로 매끄럽다. 그러나 밸브개도가 커지면 트림면에 작용하는 힘은 작아지지만 밸브 몸체에 전달되는 힘은 커지게 됨으로, 밸브 개도가 어느 정도 이상일때는 밸브전체에 힘의 평형이 이루어져 안정적인 운전이 된다.



〈그림 16〉 침식 감소를 위한 유로 방향의 조정

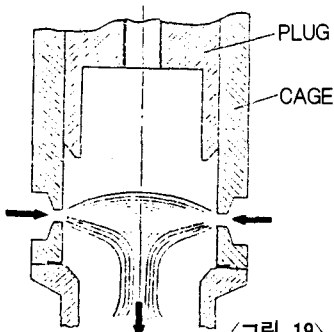


〈그림 17〉 밸브 좌면 수명 연장을 위한 Cage내의 유로 분산

〈그림 18〉 플러그에 작용하는 VENA CONTRACTA

〈그림 19〉는 하향식유로를 가진 트림형식으로서 발전소 2차 계통중 Flashing Service용으로 쓰이는 제어밸브가 채용하는 트림으로 입구측에 비하여 출구측의 압력이 상대적으로 크고, 출구측의 압력이 포화증기압이하로 되는 경우가 많은데 케이지의 스톱을 통하여 급격히 증가된 유체의 속도에너지는 케이지의 중심에서 서로 충돌, 상쇄함으로 유체가 갖고 있는 대부분의 에너지를 상실하게 된다. 이때 에너지의 손실은 압력강하로 나타난다.

계통의 특성상 Flashing이 우려되고 특히 하향유로로 밸브가 설계되었을 때는 경우에 따라 간혹 케이지 중심으로 급격한 Flashing이 밸브 몸체의 밀면에 집중적으로 작용함으로 국부적인 침식이 심하게 발생하는 경우가 있다.



〈그림 19〉 FLASHING SERVICE용 밸브트림에서 FLASHING 유로의 집중

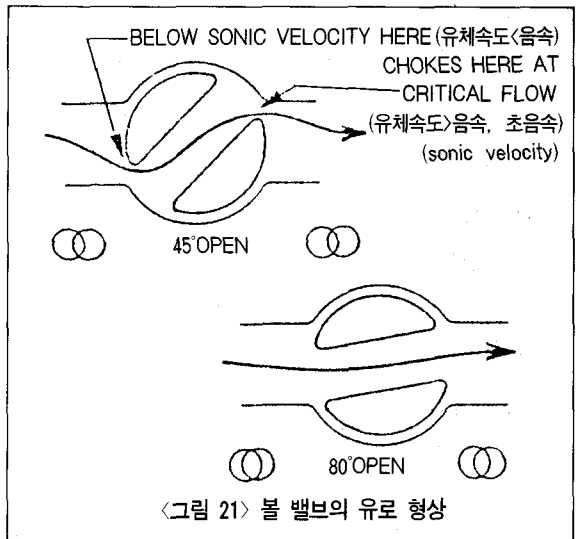
따라서 계통의 압력을 고려하여 Flashing이 예측되는 경우 밸브 몸체 밀면은 Satellite와 같은 내침식성 합금으로 도포(Coating)하는 것이 좋다.

(나) 볼 밸브

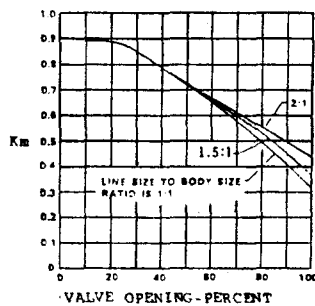
볼 밸브는 유량 특성이 매우 양호하고 고압하에서의 기밀 유지와 밸브 동작 특성이 좋은 이점이 있다. 또한 제어범위(Rangeability)가 넓은 장점도 있지만 고속 유체의 작용에는 볼을 닫으려고 하는 힘이 작용하므로 밸브 구동부의 설계에 유의하여야 한다.

〈그림 21〉에서 보는 바와같이 밸브개도의 정도에 따라 유체 흐름의 모양은 달라진다. 특히 볼 밸브는 압력회복 특성이 좋기 때문에 $K_m (=F^2)$ 값의 범위가 개도율에 따라 크게 변한다. 다시 말하면 밸브가 개도율이 크면, K_m 의 값이 상당히 낮아지므로 (0.55이하) 밸브의 최대 허용 차압이 작아져 Flashing이나 Choking이 일어나기 쉬우며 아울러 Cavitation Index도 낮아져 (0.4이하) Cavitation이 일어나기 쉽다.

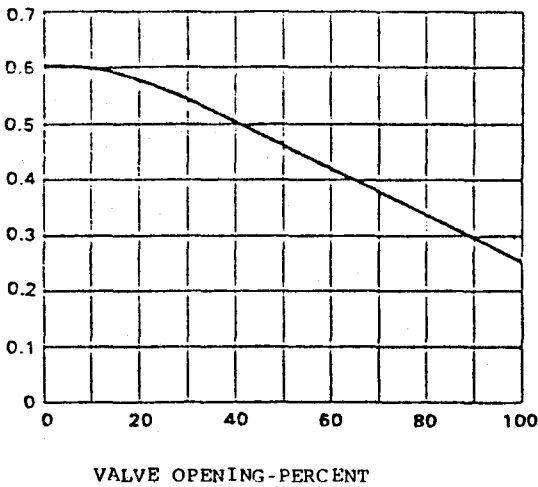
〈그림 22, 23〉은 K_m 의 값과 Cavitation Index K_c 를 밸브개도에 따라 변하고 있음을 보여준다.



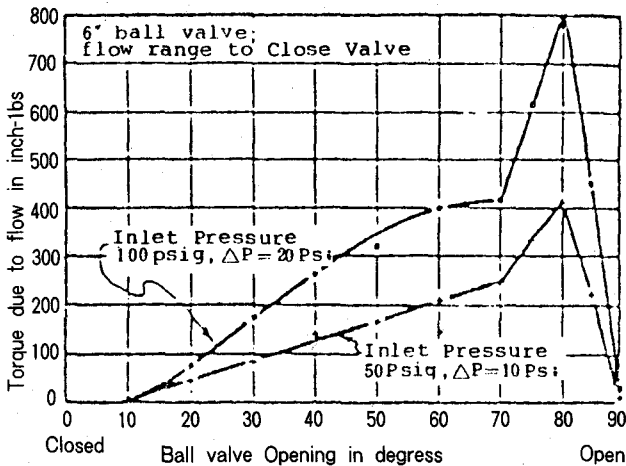
〈그림 21〉 볼 밸브의 유로 형상



〈그림 22〉 전형적 로타리 밸브의 K_m 선도



〈그림 23〉 전형적 로타리 밸브의 K-선도



〈그림 24〉 볼 밸브의 개도와 달힘 토크간의 관계

또한 일반적인 볼 밸브의 유량 특성과 밸브개도에

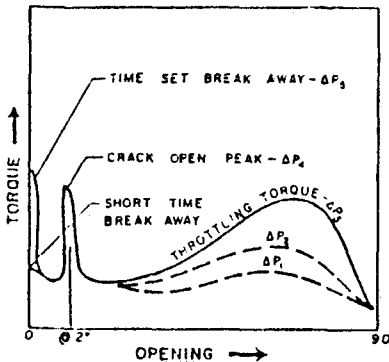
따른 밸브축의 동적 토크는

〈그림 24〉와

같다.

〈그림 25〉는 대표적 볼 밸브의 개도에 따른

〈그림 25〉 전형적 로타리 밸브의 작용 토크



토크의 변화를 나타낸 것으로 Throttling 토크보다 밸브 기동 토크가 큼을 보여준다.

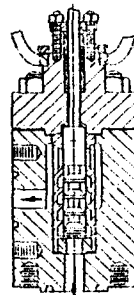
(다) CASCADE형 그로브 밸브

높은 차압 상태로 운전하는 제어밸브의 경우 일반적으로 트림 출구에서의 유체속도는 매우 빠르게 된다. 그리고 즉시 기포생성과 압력 회복 과정을 거쳐 매우 짧은 시간내에서 Cavitation 현상을 일으킨다. 이러한 Cavitation 현상을 줄이기 위한 하나의 방법으로 트림에서의 속도를 줄여 급격한 압력 강하를 완만하게 하지만 밸브 전체 계통은 요구된 차압을 유지시키는 방법이 다만 소단계 감소법(Multi Small Steps Flow Restricting Method)이다. 일반적인 단순 프리그 밸브에서의 평균 속도 수두 손실 계수는 0.8 정도이지만 다단의 단계를 거쳐 토출될때 속도 수두 손실 계수는 20정도의 값을 갖게 된다.

〈그림 26〉과 같이 유로가 각 단계(Step)를 통과 하면서 발생하는 마찰저항등에 유체에너지는 흡수되며 Cavitation이 일어나기 어렵게 된다.

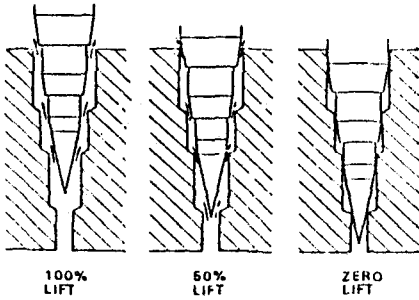
이 밸브의 트림은 밸브좌면이 22°이고, 밸브프로그가 20°로서 Cascade의 특징인 다단 오리피스 역할을 하도록 되어 있어 높은 차압이 요구되는 계통에 널리 쓰인다. 그러나 이러한 밸브의 경우 높은 개도를 유지하면 오리피스의 역할이 감소됨으로 제어 범위가 넓은 경우에 채용할 경우 Cavitation의 발생이 우려된다. Copes-Vulcan의 Cascade 트림의 경우 4000 psi의 차압 상태에서 300°F의 물을 0.05" (1.27mm)만큼 열고 운전하였을 때 밸브 좌면에 손상이 없었다는 보고가 있다.

그러나 보다 효율적인 다단 오리피스의 구성을 위해서는 다음 〈그림 27〉과 같은 Multiple Velocity Headloss Trim이 좋다.



(Cascade Flow Restricting Orifices)

〈그림 26〉 Cascade 트림에 의한 유량제어



〈그림 27〉 다단 속도수두 손실(Multiple Velocity Headloss)용 트림

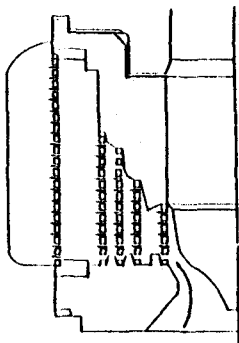
Yarway Corp.에서는 Cascade 트림을 교차되는 나선형으로 만들어 유로에 와류를 만들어 높은 차압을 만들고, 이 트림을 통과한 유체는 밸브 출구로부터 나선형 유로를 형성하여 서서히 압력 회복을 함으로 Cavitation을 현격히 감소시킬 수 있다.

Cascade 트림을 채용한 밸브에 있어서 Cavitation이 일어나지 않으려면 Cavitation Index는 다음의 값보다 커야한다.

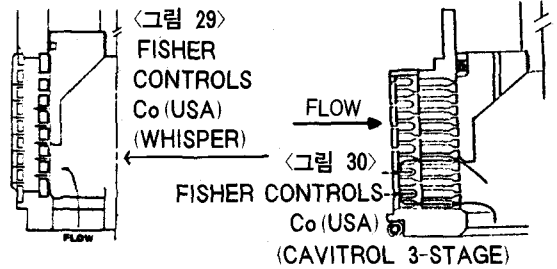
즉,

$$K_c = \frac{\Delta P}{P_1 - P_v} > 3.25 (P_1 - 0.8 \cdot \Delta P - P_v)$$

다음의 그림들은 극한사용(Severe Service)의 제어밸브 트림들로서 세계적으로 널리 알려진 제어밸브 회사들의 대표적인 트림형식이다. 이들 트림들의 공통된 원리는 앞서 언급한 다단 속도 수두 손실의 원리로서 유체속도의 점진적 속도 에너지 손실로서 의도하는 바의 압력강하 즉, 설계차압을 얻게 된다. 그림은 밸브제조회사명을 표시하고 ()안은 트림의 상품명이다.

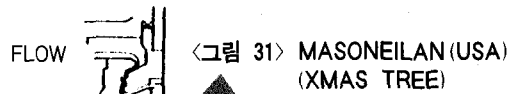


〈그림 28〉 VALTEK Co(USA) (MEGASTREAM)

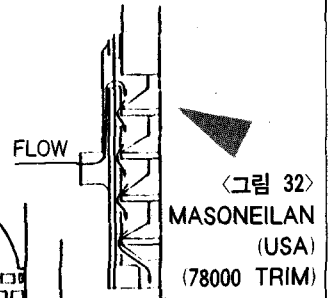


〈그림 29〉 FISHER CONTROLS Co(USA) (WHISPER)

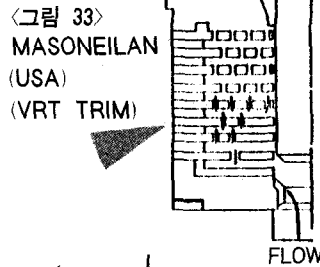
〈그림 30〉 FISHER CONTROLS Co(USA) (CAVITROL 3-STAGE)



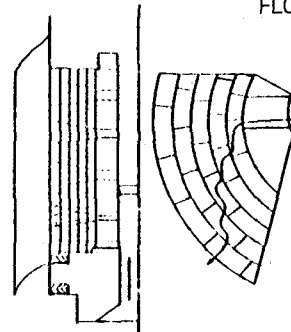
〈그림 31〉 MASONELAN(USA) (XMAS TREE)



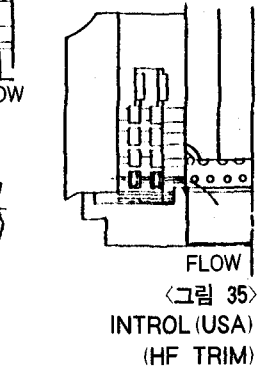
〈그림 32〉 MASONELAN (USA) (78000 TRIM)



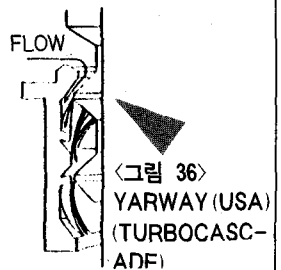
〈그림 33〉 MASONELAN (USA) (VRT TRIM)



〈그림 34〉 COPES VULCAN(USA) (HUSH TRIM)



〈그림 35〉 INTROL(USA) (HF TRIM)



〈그림 36〉 YARWAY(USA) (TURBOCASC-ADF)