

# 튜브열차 구조물의 진공 펌프 용량에 관한 파라메타 연구

## Parametric Study on the Capacity of Vacuum Pump for Tube Structure

남성원<sup>†</sup>

Seong-Won Nam

**Abstract** Parametric study has been conducted to calculate the capacity of vacuum pump system that will be used to maintain the pressure of the tube structure under atmosphere level. Recently many railroad researchers pay attention to the tube train system as one of the super high speed transportation system. To achieve the super high speed, the inside of tube system should be maintained at low pressure level. In the low pressure environment, it is well known that air resistance of train is drastically decreased. Vacuum pump system will be used to make low pressure state for tube structure, exhaust the leakage air and supplement additional vacuum pumping. As results of these studies, we get the lump capacity of vacuum pump for various parameters. These results can be applied to analyze the effects of the reduction of air resistance.

**Keywords** : Tube Structure, Vacuum Pump, Low Pressure, Leakage, High Speed Transportation

**초 록** 튜브 구조물의 압력을 대기압 이하로 유지하는데에 사용될 진공 펌프의 용량을 설정하기 위한 파라메타 연구를 수행하였다. 최근 철도 기술 연구자들은 초고속 수송 시스템의 하나인 튜브 열차 시스템에 관심을 가지게 되었다. 초고속을 달성하기 위하여 튜브 내부를 저압으로 유지할 필요가 있는데, 저압에서는 공기 저항이 극단적으로 줄어들기 때문이다. 진공 펌프 시스템은 튜브 내부를 저압으로 만들고, 누설을 보충하는 역할을 한다. 일련의 연구결과, 다양한 파라메타에 대한 진공 펌프의 용량을 구하였다. 이 결과들은 공기 저항 저감 효과를 분석하는데에 적용될 것이다.

**주요어** : 튜브 구조물, 진공 펌프, 저압, 누설, 고속 운송

### 1. 서 론

열차의 속도향상을 위하여 다양한 기술 개발이 이루어지고 있으며, 특히, 차륜-레일 방식의 속도한계를 극복하기 위하여 자기 부상 열차에 관한 기술을 이용하여 500km/h 이상의 속도도 도달할 수 있게 되었다. 그러나, 경쟁 교통 수단중 하나인 항공기 속도에는 아직 미치지 못하며, 지상에서의 초고속화에 따른 다양한 문제점들이 있기 때문에, 기존의 차량 운행 환경을 획기적으로 바꾸어서 이러한 문제점들을 해소하려는 연구 개발이 시도되고 있다. 그 중의 하나로서 열차가 주행하는 선로를 튜브로 구성하고, 튜브 내부를 상압보다 낮은 아진공 상태로 유지시키면, 열차 주행시의 공기 저항이 낮아져 차량 속도 향상과 추진 동력비 절감을 동시에 달성할 수 있을 것으로 예측된다.

이러한 개념에 기초한 초고속 튜브 열차 연구는 스위스, 미국, 러시아, 독일 등에서 다양한 형태로 기초 연구가 진행되었으며, 이를 응용하면, TKR-TCR, TSR과 같은 대륙 횡단 철도, 동북아를 연결하는 한중일 해저 터널에 적용할 수 있으며, 가깝게는 수도권 교통난 해소를 위하여 제안된 대심도 철도에도 적용될 수 있을 것이다[1].

초고속 튜브 열차의 추진은 일본의 야마나시 또는 독일의 트랜스라피드와 같은 초고속 자기부상 열차 방식으로 하더라도, 이론상 속도의 제약은 거의 없다고 할 수 있다. 목표로 정한 초고속의 차량 속도를 달성하기 위한 튜브 열차 시스템의 압력 관련 핵심 기술은, 튜브 내부를 저압으로 만드는 데 필요한 대용량 고효율의 진공 펌프 기술, 누설이 가능한 한 늦게 진행되도록 하는 튜브 구조 기밀화 건설 기술, 그리고, 감압된 튜브 내부의 압력을 저압 상태로 유지하는 기술이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 초고속 튜브 열차가 지나갈 튜브 내부를 대기압 이하의 설정 압력 상태로 만들고, 이를 유지하는데에 필요한 진공 펌프 용량에 대한 파라메타 연구를 수행하였다.

### 2. 튜브 시스템과 진공 펌프

Fig. 1 및 Fig. 2에 튜브 시스템의 개략도와 튜브 내부를 저압으로 유지하는데에 소요되는 진공 펌프의 동력과 그 결과 열차의 공기저항 저감으로 인한 동력비 절감을 각각 나타내었다. 가이드웨이를 따라 주행하는 튜브 열차시스템의 내부 압력을 대기압 이하로 유지하기 위하여는 진공 펌프의 용량과 튜브 구조물의 체적등을 고려할 때에 노선을 따라 일정 간격으로 복수의 진공 펌프를 설치할 필요가 있다. 이처럼 튜브 내부의 압력을 대기압 이하로 낮추고 이를 유지하

<sup>†</sup>교신저자 : 한국철도기술연구원 철도환경연구실  
E-mail : swnam@krii.re.kr

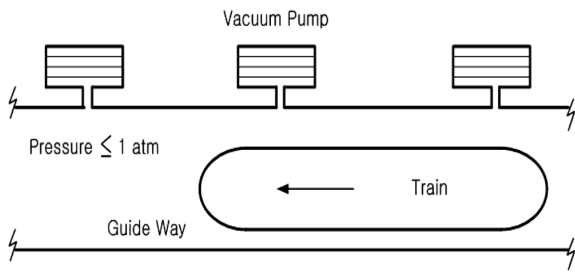


Fig. 1 Schematic Sketch of Tube System

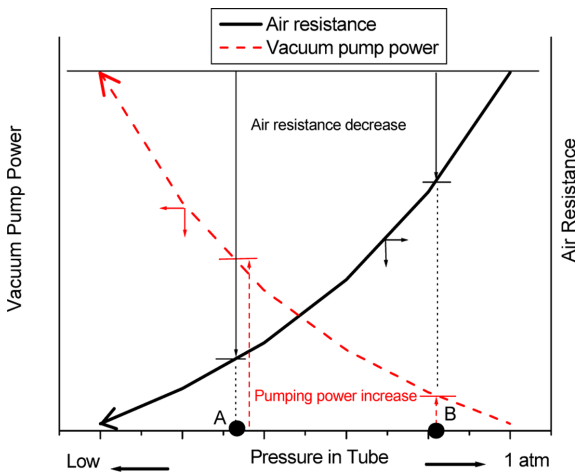


Fig. 2 Power-Resistance Curve

기 위하여 진공 펌프를 구동하는데 동력이 소요되는 반면, 열차의 공기 저항은 낮아진다. Fig. 2에서 튜브 내부의 압력을 A점으로 설정한다면 압력을 B점으로 설정하였을 때 보다 진공 펌프 구동에 동력은 더 많이 소요되지만, 열차 주행에 대한 공기 저항 저감 효과도 더 많이 얻을 수 있다. 따라서, 튜브내 압력 변화에 대한 소요 펌프 동력 곡선과 공기저항 변화 곡선의 정확한 상관 관계를 통하여 최적의 튜브내 압력을 설계할 수 있을 것으로 사료된다. 즉, 튜브내 압력 강하량  $\Delta P$ 에 대하여 열차 공기 저항력 감소량/진공 펌프 소요 동력량의 비율이 가장 큰 점을 최적의 튜브내 압력으로 설정할 수 있다.

한편, 진공 펌프는 대기압 이하의 압력 상태를 만드는 기계이며, 작동 원리에 따라 기계식과 증기 분사식으로 구분하며, 기계식은 용적형(왕복식 및 회전식)과 터보형(축류식 및 원심식)으로 세분한다. 각각의 형식은 진공 펌프가 적용되는 환경에 따라 배출 유량 및 도달 압력에 맞게 사용되며,

Table 1에 기계식 진공 펌프의 종류와 특성 범위를 나타내었다. 진공 펌프의 용량은 일반적으로 식 (1)과 같은 간이식으로 표현되며, 진공할 대상의 용적, 진공 도달 압력, 진공 도달 시간 등에 따라 그 크기를 대략적으로 산정할 수 있다.

$$S = 2.303K \frac{V}{T} \times \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (1)$$

Table 1 Characteristics of Mechanical Vacuum Pump[2]

형식		배출유량 l/min	도달압력 kPa	회전속도 rpm	
용적형	왕복식(1단~2단)	$(3\sim 100) \times 10^3$	$7 \times 10^{-2} \sim 7$	200 ~ 400	
	회전식	2엽(1단~2단)	$(3\sim 800) \times 10^3$	7 ~ 30	600 ~ 3600
		수봉	$(1\sim 250) \times 10^3$	7 ~ 20	300 ~ 3600
	배인	$(5\sim 50) \times 10$	$7 \times 10^{-1} \sim 40$	600 ~ 1500	
터보형 원심식(4단)		$(3\sim 13) \times 10^5$	30 ~ 80(각단)	~ 5000	

여기서,  $S$  = 진공 펌프의 용량 (l/min),  $V$  = 용기의 용량 (l),  $T$  = 진공 도달 시간 (min),  $P_1$  = 초기 진공도,  $P_2$  = 요구 진공도,  $K$  = 진공도에 따른 보정계수를 각각 나타낸다. 또한, 위 식은 압력 범위가 1.3Pa까지 적용되는데, 그 이하의 초진공도에서는 분자 유동과 같은 현상이 일어나기 때문이다.

### 3. 진공펌프 용량에 관한 파라메타 분석

식(1)에서 알 수 있듯이 진공 펌프의 용량을 결정하는 인자는, 진공 펌프를 사용할 대상의 용적, 진공도달 시간 및 달성하고자 하는 진공 압력이다. 본 연구에서는 Lump capacity 개념에 따라 식(1)을 적용하였는데, 이는 완전기밀은 거의 없으므로 펌핑중에도 누설이 일어나지만, 일반적으로 진공 구조물은 어느 정도 이상의 밀폐도를 유지하고 있다고 가정되므로 진공 펌핑 시간에 비하여 누설에 소요되는 시간이 더 길기 때문에 펌핑과 누설을 분리하여 계산할 수 있다. 즉, 누설량보다 펌핑량이 더 많으면, 목표로 하는 압력 수준에 도달할 수 있고, 펌핑이 끝나서 일정 압력에 도달한 후에는 누설량이 더 많으므로 본격적인 누설 상태가 되고, 그 이후는 누설-펌핑을 반복하면서 일정 압력을 유지하게 된다는 개념이다. 또한, 펌핑 도중에도 발생하는 누설을 고려하려면, 식(1)을 unsteady state로 바꾸고, 대상 구조물의 누설도를 고려하여야 하지만, 현재로서는 튜브 구조물의 누설도를 알 수 없으므로 정확하게 계산하기 어렵기 때문에 위와 같은 Lump capacity 개념을 사용하였다. 초고속 튜브 열차 시스템에서는, 진공 대상 용적은 튜브 열차가 운행될 튜브망, 역사 및 추가적인 부속 공간의 체적으로 계산할 수 있다. 본 연구에서는 제원이 정해지지 않은 역사 및 부속 공간에 대한 부분은 제외하고, 튜브망에 대해서 우선 검토하기로 한다. 단선 튜브의 직경을 5m로 가정하면, 복선 튜브의 단면적은  $39.25\text{m}^2$ 이며, 대상 노선을 대심도 철도 노선중 하나인 강남-동탄으로 가정하면 길이는 약 40km이므로 튜브망의 체적은  $1,570,000\text{m}^3$ 이다. 비교를 위하여, 경부 고속철도 복선 터널 면적인  $107\text{m}^2$ 로 한다면, 같은 노선의 전체 체적은  $4,160,000\text{m}^3$ 로서 2.65배이며, 화물용의 경우는 여객용보다 더 작게 건설할 수 있으므로 단선 튜브의 직경이 2m인 상하행선의 각각의 터널을 고려한다면 전체 체적은  $251,200\text{m}^3$ 로서, 0.16배로 줄어든다. 튜브망 내부의 도달 압력은 거대 구조물의 누설 등을 고려할 경우, 튜브망 내부를 0.1기압 이하로 유지하기에는 기술적 제약이 많을 것으로 예

상되므로 본 연구에서는 최저 압력의 크기를 0.1기압으로 가정하였다[4].

펌프 용량 산정에 영향을 끼치는 주요한 요소인 진공 도달 시간을 정의하기 위하여는 튜브 시스템의 운영 조건을 고려할 필요가 있다. 즉, 대기압에서부터 요구되는 진공도까지 도달하는데에 소요되는 시간과 시스템의 고장이 발생하였을 때에 복구에 필요한 시간을 같이 고려할 필요가 있다. 초기 진공도 도달 시간을 길게 설정하면, 필요한 진공 펌프의 용량을 작게 설계할 수도 있으나, 이와 같이 설계된 시스템에서 운영중 고장이 발생하여 압력 조절이 실패한다면, 필요한 진공 압력까지 대기압에서 다시 낮추어야 하므로 초기 진공도 도달 시간만큼 길게 설정할 수 없을 것으로 판단된다. 즉, 초기 진공도 도달 시간을 24시간으로 정한다면, 동일한 진공펌프 시스템으로 압력을 복구하는데에 24시간이 소요되며, 초기 진공도 도달 시간을 1시간으로 단축시킨다면, 시스템의 압력 복구 시간도 같이 줄어들게 된다고 할 수 있다. Fig. 3은 튜브 체적 1,570,000m<sup>3</sup>을 대상으로 내부의 설정 압력 크기에 대한 진공 펌프 용량을 진공 도달 시간별

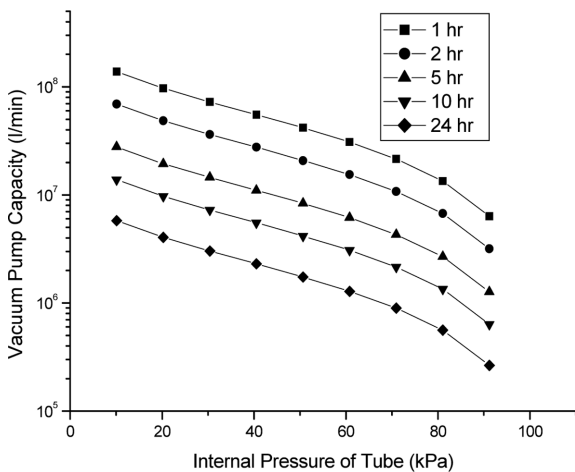


Fig. 3 Pump Capacity-Pressure Curve

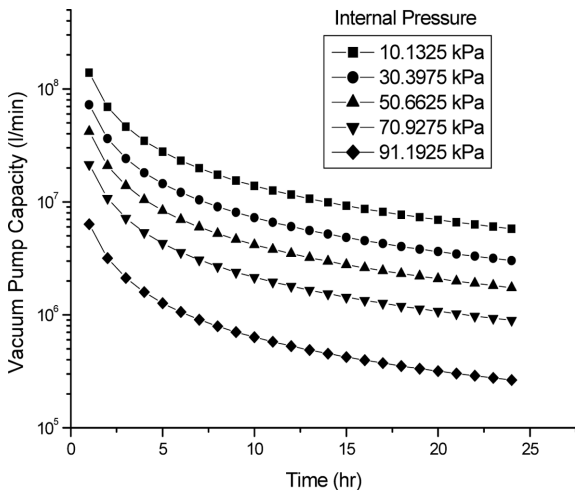


Fig. 4 Pump Capacity-Time Curve

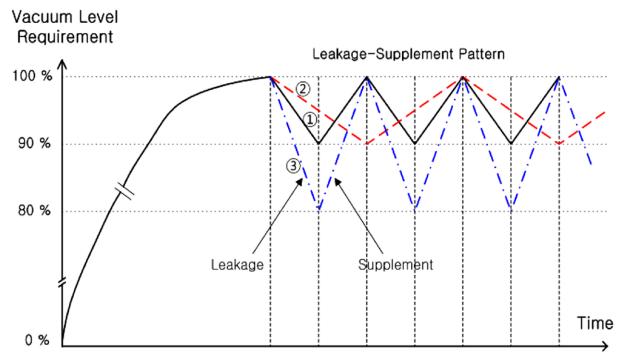


Fig. 5 Leakage-Supplement Pattern

로 나타난 그림이다. 진공도에 따른 보정계수는 1.0로 가정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 튜브 내부의 압력을 낮게 할수록 소요되는 진공 펌프의 용량은 커지며, 0.1기압 및 0.5기압으로 유지하려면 0.9기압일때에 비하여 각각 약 22배 및 6.5배의 진공 펌프 용량이 필요하다. 또한, 동일한 기압에 대하여 진공도달 시간을 1시간 및 10시간으로 설정할 경우, 24시간으로 설정하였을 때에 비하여 각각 24배 및 2.4배로 시간에 정비례함을 알 수 있다. Fig. 4에는 독립 변수를 바꾸어서 진공 도달 시간에 대한 튜브 내부 압력별로 소요되는 진공 펌프 용량을 계산하였다. 그림 3과 마찬가지로 진공 도달 시간이 짧을수록 큰 용량의 진공 펌프가 필요함을 알 수 있으며, 이러한 유형은 튜브 내부 압력이 낮을수록 커진다.

진공 펌프 시스템은 튜브 내부의 압력을 낮추는데에만 사용되는 것이 아니라, 감압된 튜브 내부의 압력을 어느 허용 범위 내에서 유지되도록 하는데에도 사용된다. Fig. 5에 예상되는 압력 누설-보충 유형을 표시하였다. 그림에서 초기에 설정한 진공 압력에 100% 도달한 이후에는, 튜브망 시스템의 부분적인 누설로 인하여 목표 도달 압력의 일정 수준 범위까지 내려간다. 즉, 유형 ①의 경우, 목표로 한 저압 수준에 도달한 후, 90% 수준까지 누설이 허용되고 그 이후는 감압시켜 다시 100% 수준으로 되돌리는 형태이며, 유형 ②의 경우는, 누설 허용 수준은 90%로 유형 ①과 같지만 누설이 진행되는 시간이 유형 ①의 2배로 길게 진행되는 형태이며, 유형 ③은 유형 ①과 같은 누설 시간 동안에 압력 누설 수준을 기준값 대비 80%까지 허용하는 것으로 가정하였다. 따라서 유형 ②는 유형 ①에 비하여 압력 누설 및 보충량은 같으나 도달 시간이 길어서 진공 펌프 용량이 작아지며, 유형 ③은 유형 ①과 도달 시간은 같지만 보충할량이 많아지므로 진공 펌프 용량이 커지는 시나리오이다. 예를들면, 펌핑으로 인하여 일정 압력에 도달한 튜브 내부 압력이 누설로 인하여 일정시간 동안에 목표 압력의 90% 수준으로 되었다면, 펌핑을 통하여 동일한 시간내에 압력을 원상 회복시키는 것이 이상적일 것으로 판단한 것이며,

이것은 진공펌프의 용량에 관계되며, 누설에 소요된 시간보다 더 짧은 시간에 펌핑을 하려면 보다 더 큰 용량의 진공펌프가 필요하며, 더 긴 시간에 걸쳐 완만하게 펌핑을 하려면 더 작은 용량의 진공펌프가 필요할 것이다. Fig. 6 및 7에 튜브 내부의 압력 누설 한도를 각각 90%와 80%까지 허

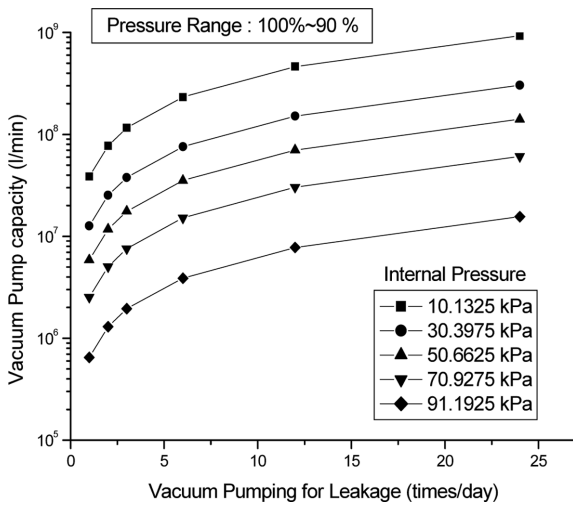


Fig. 6 Pump Capacity-Leakage Curve(90%)

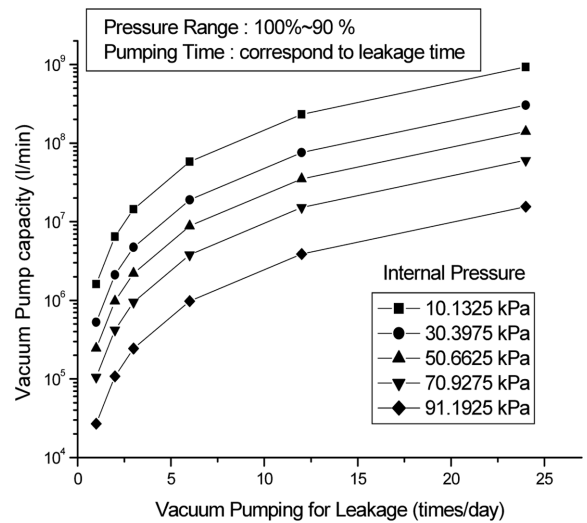


Fig. 8 Pump Capacity-Leakage Curve

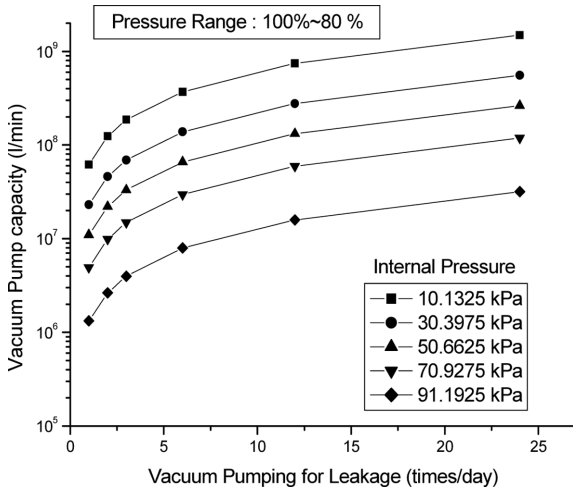


Fig. 7 Pump Capacity-Leakage Curve(80%)

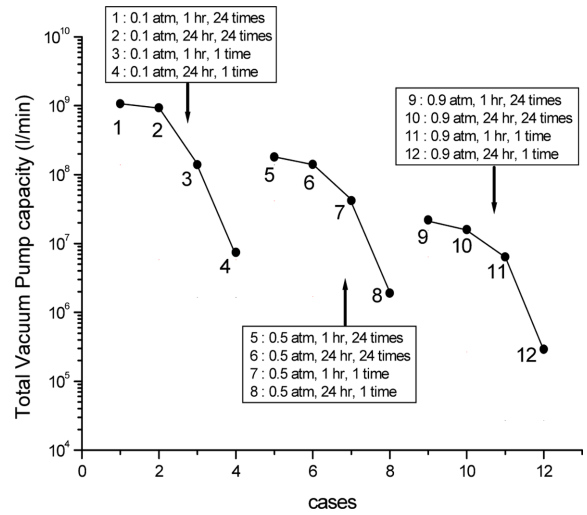


Fig. 9 Total Capacity for Cases

용할 경우에 대하여 추가적으로 배출하여야 할 진공 펌프의 용량을 나타내었다. 그림에서 x축은 누설 압력에 대하여 보충할 1일간 진공 펌핑 횟수를 나타낸다. 즉, 튜브내 압력 상승 허용 한도까지의 누설 및 이에 대한 보충에 소요되는 경과 시간이 1시간당 1회씩이라면 하루 동안 진공 펌프의 작동 횟수는 24회이며, 경과시간이 2, 4, 8, 12 및 24시간 이라면 각각 12, 6, 3, 2 및 1회씩 진공 펌프가 작동하게 된다. 이와 같이, 튜브 구조물의 압력 기밀 설계가 잘되어 있다면, 압력 누설을 보충하기 위한 진공 펌프의 작동 횟수는 그만큼 줄어들게 된다.

동일한 진공 펌핑 횟수에 대하여 허용되는 압력 상승폭이 클수록 이를 보충하기 위하여 소요되는 펌프의 일량이 많아 지므로 더 큰 용량의 진공 펌프가 필요하게 되며, 튜브 내부의 목표 설정 압력이 낮을수록 이러한 경향은 더 커진다.

동일한 조건에서 기준값 대비 80%까지 누설된 압력을 보충하기 위하여는 90%까지 허용된 경우보다 1.5~2배 정도의 진공 펌프 용량이 더 필요함을 알 수 있다. Fig. 8은 압력

누설 한도를 90%까지로 한 경우, 보충에 소요되는 시간이 누설 경과 시간에 상당하는 경우에 대한 진공 펌프 용량을 구한 것이다. Fig. 6과 비교하면, 동일한 조건에서 진공 도달 시간 횟수가 변한 경우에 해당된다. 즉, 튜브시스템의 기밀 성능이 우수하여 압력 누설이 완만하게 일어나면 이를 보충하는데 소요되는 시간이 길어도 되므로 보충 가동 횟수도 줄어들게 된다.

Fig. 9에 튜브내 압력 강하에 필요한 펌프 용량과 이후 이를 유지하는데 소요되는 펌프 용량의 합계를 여러 가지 파라메타에 대하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 튜브 내부를 저압으로 유지하기 위하여는 진공 펌프의 용량이 기하급수적으로 증가함을 알 수 있으며, 이러한 패턴은 진공 도달 시간이 짧을수록, 그리고 튜브 구조물의 압력 누설이 심하여 보충을 자주 할수록 증가한다. Fig. 9에서 0.1기압에 대하여 초기 진공 도달 시간이 1시간, 하루당 보충 작동 횟수를 24번으로 하였을 경우는 약  $1.0 \times 10^9$  l/min의 펌프 용량

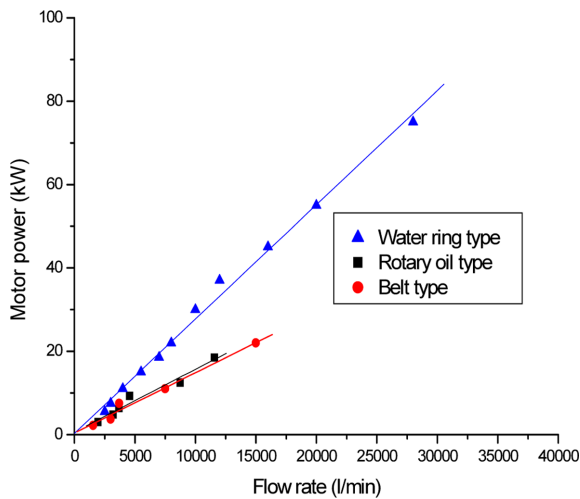


Fig. 10 Motor Power to Flow Rate[3]

이 필요하며, 같은 조건에서 초기 진공 도달 시간을 24시간으로 하면, 약  $9.35 \times 10^8$  l/min이, 진공도달 시간이 1시간이며 보충 작동 횟수가 1번일 경우는 약  $1.4 \times 10^8$  l/min, 진공도달 시간이 24시간이고 작동 횟수가 1번일 경우는 약  $7.43 \times 10^6$  l/min으로 최대값 대비 각각 87%, 13%, 0.7%로 작아진다. 0.5기압에 대하여 초기 진공 도달 시간이 1시간, 하루당 보충 작동 횟수를 24번으로 하였을 경우는 약  $1.8 \times 10^8$  l/min의 펌프 용량이 필요하며, 같은 조건에서 초기 진공 도달 시간을 24시간으로 하면, 약  $1.41 \times 10^8$  l/min이, 진공도달 시간이 1시간이며 보충 작동 횟수가 1번일 경우는 약  $4.21 \times 10^7$  l/min, 진공도달 시간이 24시간이고 작동 횟수가 1번일 경우는 약  $1.9 \times 10^6$  l/min으로 최대값 대비 각각 78%, 23%, 1.1%로 작아진다. 0.9기압에 대하여 초기 진공 도달 시간이 1시간, 하루당 보충 작동 횟수를 24번으로 하였을 경우는 약  $2.195 \times 10^7$  l/min의 펌프 용량이 필요하며, 같은 조건에서 초기 진공 도달 시간을 24시간으로 하면, 약  $1.5864 \times 10^7$  l/min이, 진공도달 시간이 1시간이며 보충 작동 횟수가 1번일 경우는 약  $6.376 \times 10^6$  l/min, 진공도달 시간이 24시간이고 작동 횟수가 1번일 경우는 약  $2.92 \times 10^5$  l/min으로 최대값 대비 각각 72%, 29%, 1.3%로 작아진다. 튜브 시스템 내부의 압력이 낮고, 초기 진공 도달 시간이 길며, 보충 작동 횟수가 작을수록 필요한 진공 펌프의 용량은 작아지는 경향을 나타낸다. 따라서, 튜브 시스템 구조물의 기밀 설계 및 시공 여부가 진공 펌프 용량을 결정하는 주요 변수임을 알 수 있다. Fig. 10에는 시중에 시판중인 진공 펌프 용량에 대한 구동 모터

의 동력을 나타내었다[2]. 로타리 방식이나 벨트 방식의 진공 펌프가 유량 대비 모터 동력이 덜 소요되는 것을 알 수 있으며, 진공 펌프 방식은 도달 가능 압력과의 관계가 있으므로 튜브 시스템의 정확한 제원과 압력 기밀도 등이 결정되면 정해될 수 있을 것으로 판단된다. 그 외에도, 역사 공간 및 튜브내 추가 공간에 대한 검토를 통하여 전체 튜브 시스템의 소요 체적과 이에 대한 진공 펌프 용량을 정밀하게 산정할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 튜브 열차 시스템의 진공 펌프 용량에 관한 파라메타 영향을 분석하였다. 튜브 시스템 내부의 압력 강하에 사용되는 진공 펌프의 용량 결정에 관계되는 주요 파라메타인 튜브 체적, 진공 도달 시간, 요구 압력의 영향에 관하여 정량적으로 분석하였다. 대상 노선은 언론에서 언급되는 구간으로 임의로 선정하였으며, 도달 압력의 크기는 0.1기압~0.9기압으로, 초기 진공 도달 시간은 1시간~24시간, 압력 누설에 따른 보충 작동 시간은 1회~24회/일로 가정하였다. 연구 결과, 각각의 시나리오에 대한 진공 펌프 소요 용량을 구할 수 있었으며, 진공 펌프 용량 크기에 가장 큰 영향을 끼치는 것은 튜브내 도달 압력 정도와 튜브 구조물의 압력 기밀도임을 알 수 있다. 향후에는, 진공 펌프의 구동에 소요되는 동력과 튜브내 감압 결과로 얻어지는 열차의 공기 저항 감소에 따른 동력비 절감 효과의 비교, 튜브망 뿐만 아니라 역사의 체적과 부가적인 공간도 포함하여 검토할 필요가 있다.

#### 참고문헌

- [1] J. Lee, K.S. Lim, D. Nam, H. Kwon, J.Y. Kim, (2008) Performance Requirement and Economic Efficiency for Tube Transportation System, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(5), pp. 513-518.
- [2] JSME Mechanical Engineers' Handbook (1998) Fluid Machinery, pp. 156-161.
- [3] Private Communication, <http://www.beckerkorea.com/>.
- [4] KRRI Report (2007) A Study on the Rail Path Breaking Technology, pp. 12-35.

접수일(2010년 6월 30일), 수정일(2010년 8월 30일),  
게재확정일(2010년 9월 6일)