

수력이송계통 배관 내부 캡슐 이송 거동 Part II. 실험 결과

정준호* · 오진호**†

Transport of a capsule immersed in the pipe Part II. Experimental Results

Joonho Jeong*, Jinho Oh**†

Key Words : Hydraulic Transfer System(수력이송계통), Capsule transport(캡슐 이송), Capsule transport speed(캡슐 이송 속도)

ABSTRACT

The Hydraulic Transfer System(HTS) is a facility for producing various radioisotopes, and it enables us to transfer materials irradiated into the reactor core remotely. The irradiation capsules or targets, which are the aluminium capsules for sealing materials irradiated, pass through the pipe by hydraulic force due to pump operation. When the irradiation capsules are transferred, the moving speed of those should be controlled intendedly to maintain the structural integrity themselves and not to exceed the limit of the insertion rate. Thus, the main design parameter is concluded by the flow rate and the drag force resulting from the water gap between the capsule and the pipe wall. In the part I of this paper, the moving speed of the capsule is predicted based on the theoretical background, and the experimental loop design is presented. In the part II, the experimental results are compared with the theoretical results. Finally, the design parameters for the HTS will be determined.

1. 서 론

Part I에서는 배관 내부의 유량 변화에 따른 표적의 이송 속도를 예측하기 위한 운동방정식을 유도하고 점성마찰력에 의한 효과를 고려하여 유량과 조사 표적 이송 속도 간의 상관 관계를 규명하였다. 이러한 배경 하에 적정 수준으로 조사 표적 이송 속도를 제어할 수 있는 배관 크기를 결정하였고 수력이송계통 배치안을 기반으로 조사 표적의 이송 거동을 실험적으로 검증하기 위한 루프를 구축하였다. 수두 손실 계산을 통해 31 mm 배관 내부에서의 유속을 대략 0~2.5 m/s 범위까지 조절 가능한 인버터 펌프를 선정하여 다양한 조건에서의 실험을 가능하게 하였다.

Part II에서는 실험 루프를 구성 후 유량과 표적 이송 속도 간의 상관 관계를 실험적으로 살펴보고 Part I에서 유도한 운동 방정식 결과를 비교하여 예측식의 유용성을 검증하고자 한다. 표적 이송 구간에 해당하는 배관 레이아웃은 수력이송계통 배치와 동일하게 구성하였으며 수력이송계통의

원활한 운영이 이루어질 수 있는 설계 변수들을 찾아내기 위한 실험을 병행하였다.

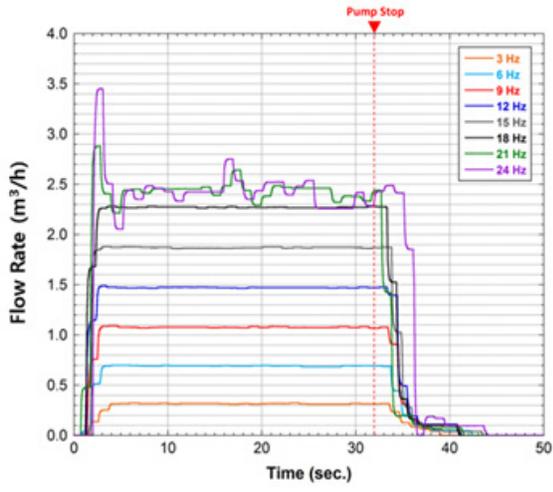
2. 실험 루프 특성

우선 인버터 펌프의 가동 주파수 변화에 따른 유량을 확인하여 작동 가능 범위를 살펴보았다. 펌프 전단에 설치한 유량계 FE001과 후단에 설치한 FE002에서의 측정 신호는 다음 Fig. 1~4에 도시하였다. 인버터 펌프의 가동 주파수 범위는 0~60 Hz로 우회유로를 차단하였을 때 대략 18 Hz 까지 인버터 펌프의 주파수에 따라 유량이 선형으로 증가하였으며 우회 유로를 개방하였을 때는 인버터 펌프의 주파수와 유량 간의 선형 영역이 확대되었으나 펌프 전·후 단에서의 유량 차이가 벌어지는 현상이 발생하였다. 이는 간이스조 내에 설치된 표적 이송스테이션이 완전히 기밀 유지를 못하는 탓에 유량 증가에 따라 누설량 또한 증가하였기 때문으로 보이며 이후의 모든 실험은 우회 유로를 개방한 상

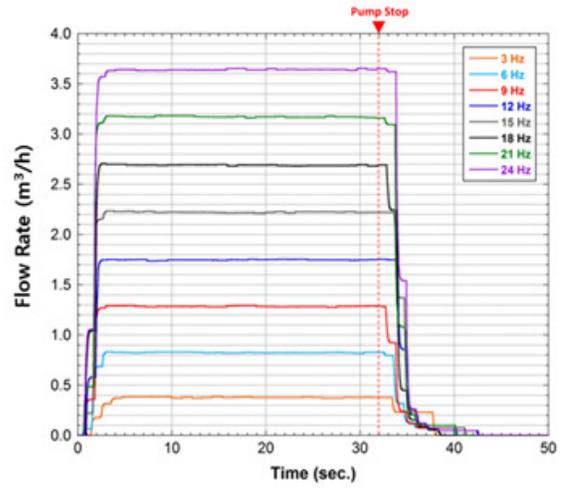
* 한국원자력연구원 (KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute))

** 한국원자력연구원 (KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute))

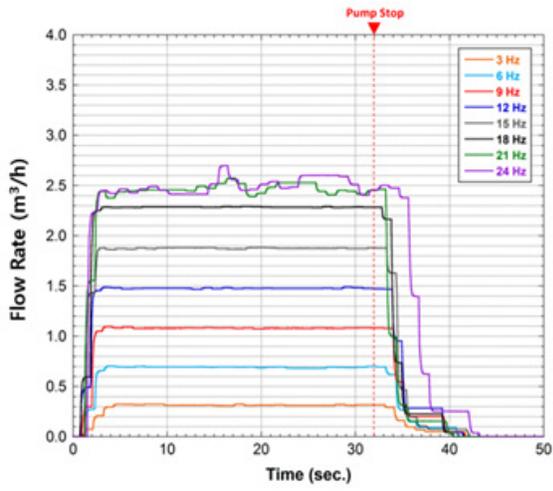
† 교신저자, E-mail : jinhooh@kaeri.re.kr



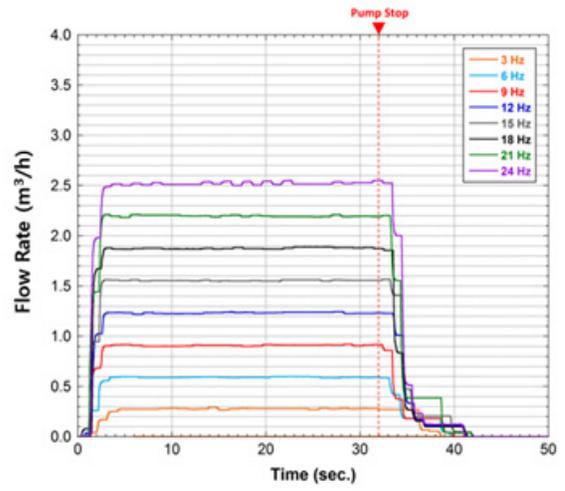
(a) FE 001



(a) FE 001



(b) FE 002



(b) FE 002

Fig. 1 Flow rate measurement result when closing bypass

Fig. 3 Flow rate measurement result when opening bypass

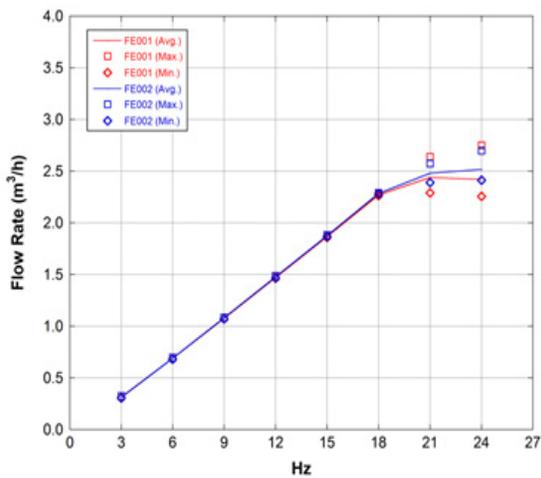


Fig. 2 Flow rate varying frequency on an inverter pump when closing bypass

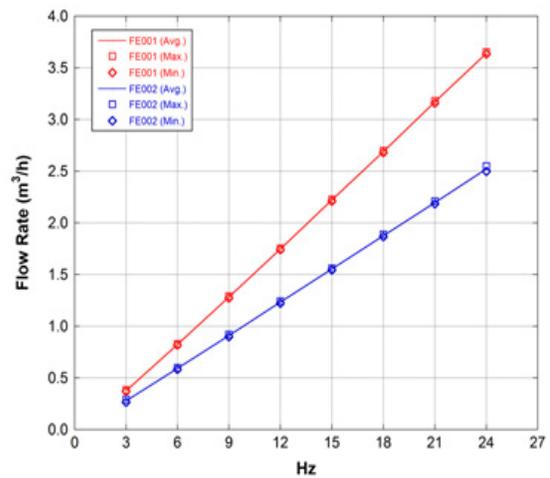


Fig. 4 Flow rate varying frequency on an inverter pump when opening bypass

테로 진행하였다. 한편 인버터 펌프 주파수 변화에 따른 계통 유량과 조사 표적 이송 구간에 해당하는 배관 내부에서의 유속은 Table 1과 2와 같다.

3. 자유 낙하

Fig. 5에서와 같이 특정 부위를 투명한 아크릴 배관으로 제작하고 총 5 곳에 광센서(Z001~005)를 설치하여 조사 표적의 움직임을 확인할 수 있도록 하였다. 인버터 15 Hz (유량 : 1.6 m³/h)로 설정하고 무게가 150 g인 조사 표적이 특정 위치에 도달 시 펌프를 정지시켜 조사 표적이 수직 구간의 배관 내부에서 자유 낙하가 이루어지도록 하였다. 자유 낙하 상태에서의 조사 표적 이송 속도는 펌프 구동력이 상실된 상태에서 수력이송계통에서 제어할 수 있는 최저 속도에 해당하게 된다. Fig. 6는 광센서를 통해 조사 표적의 구간별 평균 속도를 측정된 결과로 Z003에서 조사 표적 감지하고 1초 후와 Z003에서 조사 표적 감지 즉시 그리고 Z002에서 조사 표적을 감지하고 나서 4초 후에 펌프 구동

을 정지시켰을 때 수직 구간에서 조사 표적의 평균 속도가 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 무게가 150 g인 조사 표적이 수직인 배관 구간에서 자유 낙하에 돌입하는 시점을 유추할 수 있으며 이때 조사 표적의 종단 속도는 대략 0.23 m/s인 것으로 파악된다. Fig. 7은 구간별 이송 시간을 측정된 결과로 조사 표적의 이송을 최저 속도로 제어할 경우 조사 표적의 장전까지 약 25~30초 정도가 소요될 것으로 예상할 수 있다.

Table 1 Flow rate and flow speed inside pipe (inner diameter : 31 mm) varying frequency on an inverter pump when closing bypass

Freq. Hz	Flow Rate			Flow Speed m/s
	m ³ /h	liter/m	liter/s	
3	0.313	5.217	0.069	0.115
6	0.691	11.517	0.192	0.254
9	1.081	18.017	0.300	0.398
12	1.478	24.633	0.411	0.544
15	1.877	31.283	0.521	0.691
18	2.286	38.100	0.635	0.841

Table 2 Flow rate and flow speed inside pipe (inner diameter : 31 mm) varying frequency on an inverter pump when opening bypass

Freq. Hz	Flow Rate			Flow Speed m/s
	m ³ /h	liter/m	liter/s	
3	0.278	4.633	0.077	0.102
6	0.592	9.867	0.164	0.218
9	0.900	15.000	0.250	0.331
12	1.224	20.400	0.340	0.450
15	1.547	25.783	0.430	0.569
18	1.889	31.483	0.525	0.695
21	2.210	36.833	0.614	0.813
24	2.549	42.483	0.708	0.938

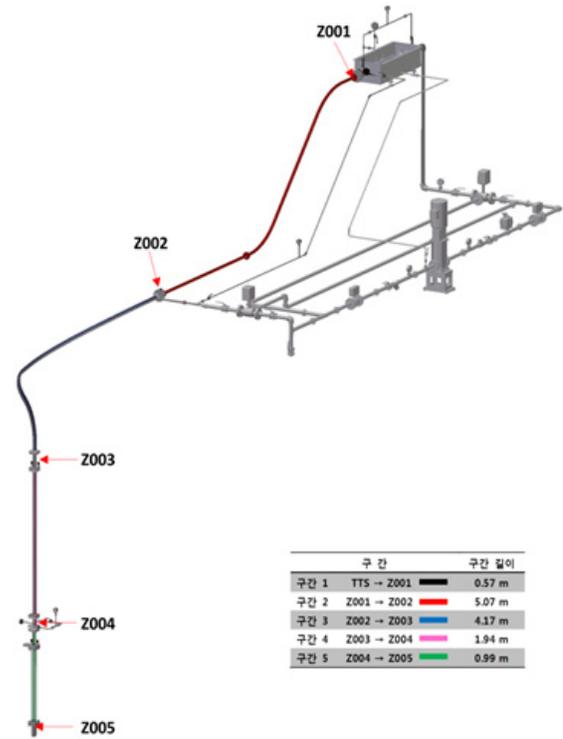


Fig. 5 Location of optical sensors on the HTS mock up loop

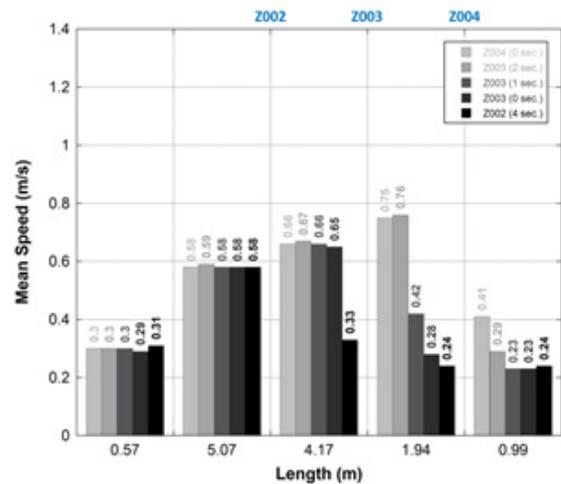


Fig. 6 Mean speed of an irradiation capsule (150 g) varying pump stop time

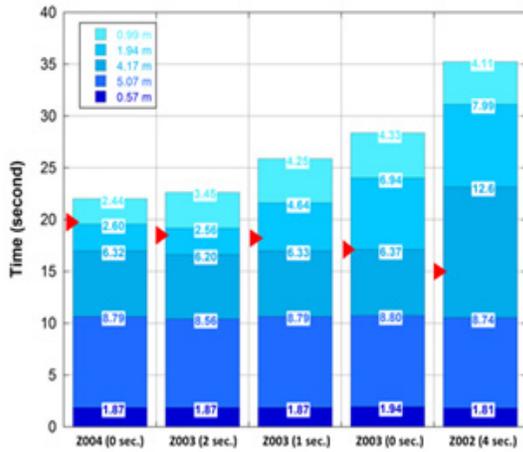


Fig. 7 Transport time of an irradiation capsule (150 g) for each section (▶ : pump stop)

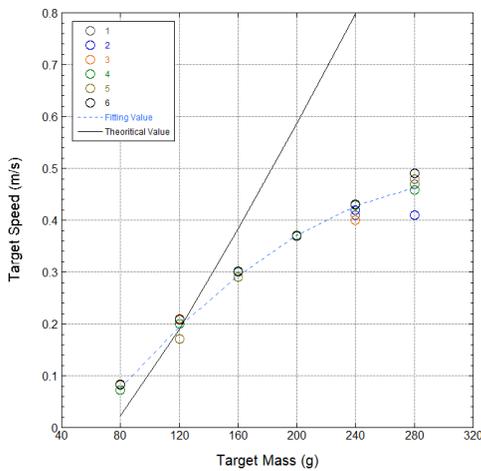
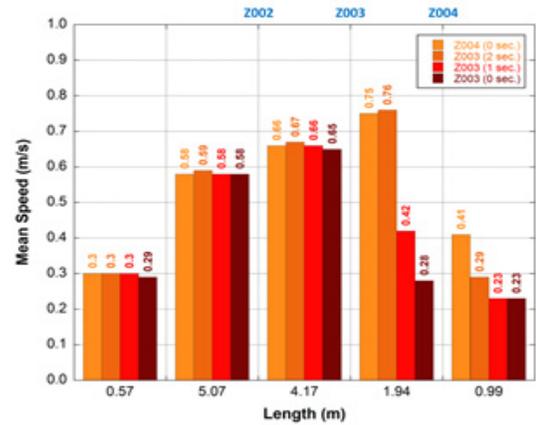
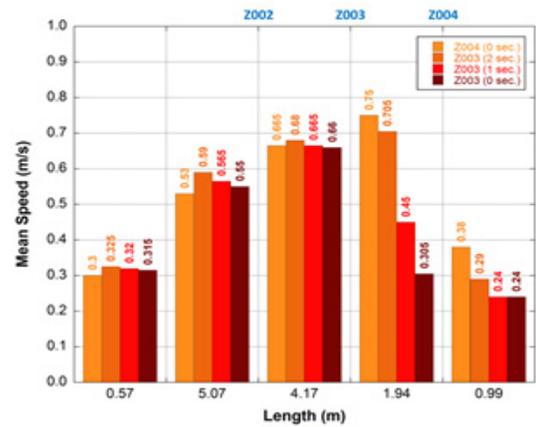


Fig. 8 Terminal speed of an irradiation capsule in free fall varying its weight

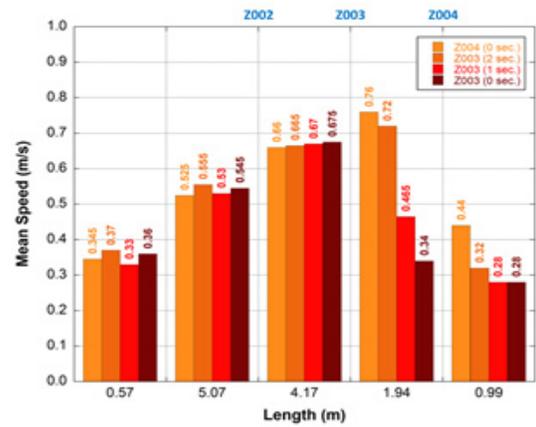
수직한 배관 내부에서 유량에 따른 조사 표적의 이송 속도의 상관 관계를 규명하기 위해 유도한 예측식의 결과^(1,2)와 실험 결과를 비교하기 위하여 조사 표적의 무게를 40 g 씩 증가시켜 자유 낙하 시 종단 속도를 측정하였다. 인버터 펌프의 주파수를 10 Hz로 설정하고 Z003에서 조사 표적을 감지하고 즉시 펌프를 정지시킨 경우와 Z003에서 감지하고 1초 후에 펌프를 정지시킨 경우에 대해 각각 3번의 실험을 진행하였고 조사 표적의 무게 증가에 따른 자유 낙하 시 종단 속도 변화 추이는 Fig. 8에 도시하였다. 배관 내부에 유체가 흐를 때 조사 표적의 이송 속도를 예측하기 위한 운동 방정식을 유도하는 과정에서 점성 마찰력을 주요한 변수로 취급하였으며 유량과 조사 표적 이송 속도는 선형 관계로 표현할 수 있었다. 그러나 실제 실험 결과에서는 각 해당 무게에서 총 6회의 실험을 실시한 결과의 추정치는 조사 표적의 무게와 자유 낙하 시 종단 속도는 2차 다항식 형태로 근사할 수 있었다. 조사 표적의 무게가 증가함에 따라 실험 결



(a) one irradiation capsule



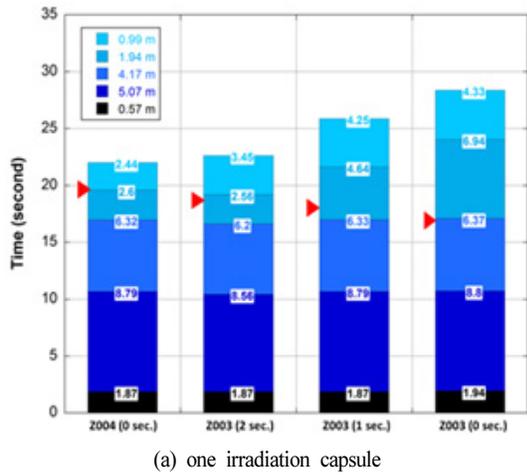
(b) two irradiation capsules



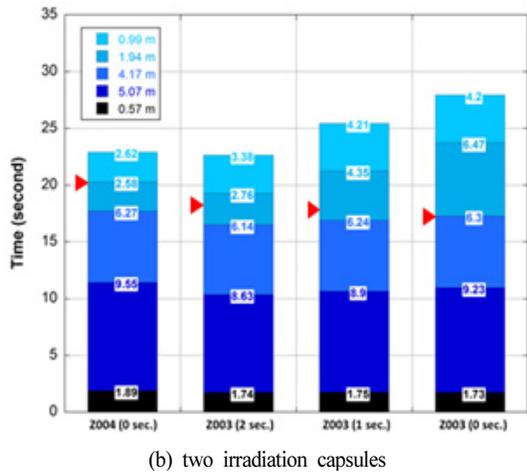
(c) three irradiation capsules

Fig. 9 Mean speed of irradiation capsules (150 g) with the number of the irradiation capsules

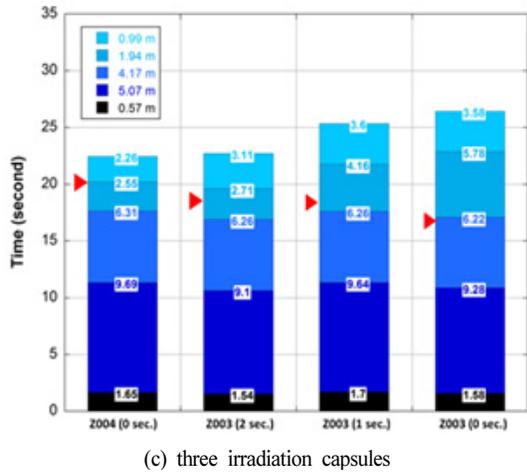
과와 예측 결과와의 격차가 벌어지는 현상은 배관 내벽과 조사 표적 사이에서의 점성 마찰력 외에 다른 요인들이 작용했기 때문으로 보인다. 배관 내부에서의 조사 표적의 이송 속도를 유도하는 과정에서 상정한 가정과 달리 수직 구간에서 조사 표적이 정확하게 배관 중심을 따라 이송되지는 않았을 것이며 조사 표적의 형상에 의해 발생하게 되는 효과를 이론적 유도 과정에서 반영하는 것은 실상 불가능하



(a) one irradiation capsule



(b) two irradiation capsules



(c) three irradiation capsules

Fig. 10 Transport time of irradiation capsules (150 g) for each section (▶ : pump stop) with the number of the irradiation capsules

다고 볼 수 있다.

인버터 펌프의 주파수를 15 Hz 설정하고 동일한 방식으로 150 g 조사 표적 개수에 따른 자유 낙하 거동을 살펴보았다. Fig. 9는 각 구간별로 측정된 조사 표적의 이송 속도이며 Fig. 10에는 구간별 이송 시간을 도시하였다.

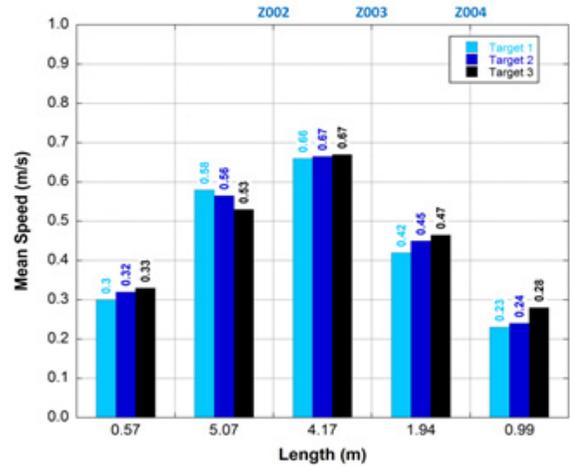


Fig. 11 Mean speed of irradiation capsules (150 g) with the number of the irradiation capsules when stop the inverter pump a second after detecting irradiation capsules on Z003

Fig. 9에서와 확인할 수 있듯이 조사 표적의 개수가 증가함에 따라 낙하 속도의 변화가 관찰되었으며, 광센서 위치 Z003에서 조사 표적을 감지하고 1초 후에 펌프를 정지하였을 때 구간 별 평균 속도로 조사 표적 개수에 따라 이송 속도의 변화를 Fig. 11에서 자세히 살펴볼 수 있다. 조사 표적 개수의 증가는 원통의 길이가 증가된 것으로 볼 수 있으며 형상에 따라 달라지는 항력에 의해 자유 낙하 시 중단 속도의 변화가 일어난 것으로 볼 수 있다.

4. 조사 표적 상승 유량

조사가 완료된 조사 표적을 표적이송스테이션으로 회수하기 위해 수력이송계통에 설치된 3방 밸브의 조작하게 되면 조사 표적 이송 구간에 해당하는 배관 내부의 유체 흐름은 조사 표적 장전 시의 역방향이 된다. 인버터 펌프의 가동 주파수를 0.1 Hz (0.22 liter/s) 씩 증가시켜 광센서 Z004에서 조사 표적을 감지할 수 있는 유량을 수직 구간에서 조사 표적을 상승시키기 위한 최소 유량으로 간주하였으며 이는 조사 표적 이송 속도를 최저속도로 제어할 수 있는 운전 조건에 해당한다. 역시 조사물의 중량과 조사 표적의 개수에 따른 조사 표적 상승에 필요한 최소 유량을 Fig. 12에 도시하였으며 Z005와 Z004에 설치된 광센서를 통해 측정된 조사 표적의 평균 이송 속도는 Fig. 13에서 확인할 수 있다.

Fig. 12의 결과를 통해 추세를 유추하면 Fig. 14과 같이 2차 다항식 형태를 띠게 되며 역시 조사 표적 이송 거동을 예측하기 위해 유도된 방정식에서의 결과와 같은 선형 관계가 성립되지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 또한 120 g 조사 표적의 경우 약 0.5 m³/h의 최소 유량이 필요할 것으로 예측하였고 240 g 조사 표적은 약 2.0 m³/h의 유량이

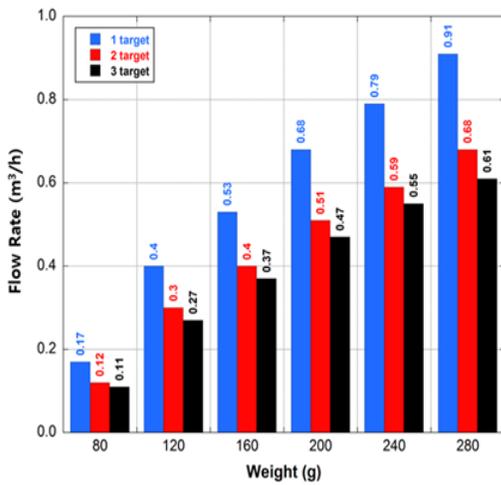


Fig. 12 Minimum flow rate required to raise the irradiation capsules varying the number of the irradiation capsules and the weight of the irradiation capsules

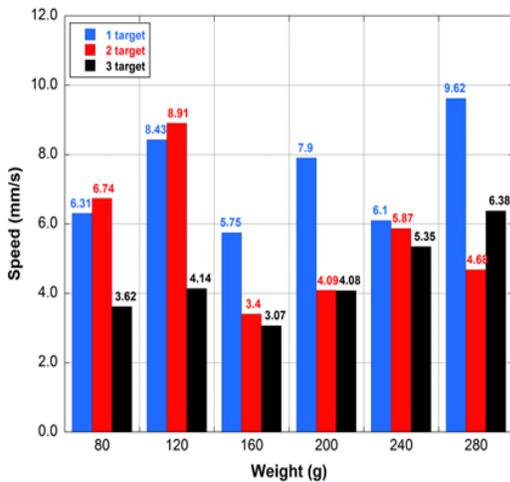


Fig. 13 Mean speed of the irradiation capsules in case of minimum flow rate

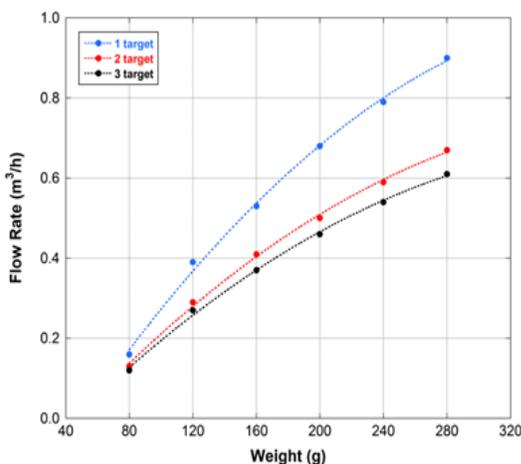


Fig. 14 Fitting results of the minimum flow rate

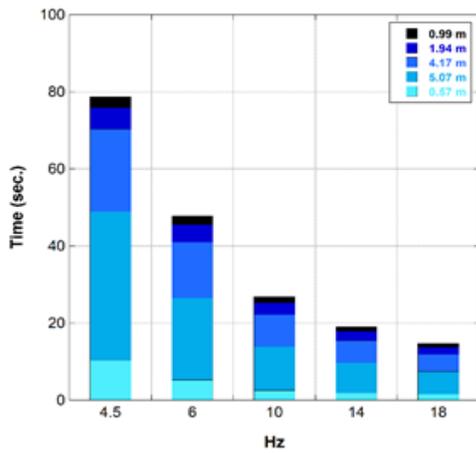
확보되어야 조사 표적을 인출할 수 있을 것으로 보였으나 실험에서는 그보다 훨씬 작은 유량에서 조사 표적이 상승하여 조사 표적의 낙하하는 상황보다 인출 상황에서 예측식의 결과와 실험 결과의 오차가 크게 나타났다. 다만 Fig. 14에 도시한 최소 유량은 조사관집합체를 벗어나기 위한 상승 유량으로 상승 이후 조사 표적이 정지 상태에 놓이는 경우도 발생하였다. 인버터 펌프를 통한 미세 유량 조절이 어려운 상황 그리고 초기에 조사 표적이 위치 정렬이 미치는 영향이 적지 않을 것으로 보이며 특히나 조사관집합체는 유로 면적이 급격하게 변하게 되는 곳으로 정확한 현상을 예측하기란 사실상 불가능하다. 예측 결과와 실험 결과 사이의 상당 부분 오차가 존재하기는 하나 대략적인 추이와 변화 폭을 가늠할 수 있다는 측면에서 유도된 운동 방정식의 유용성을 확인할 수 있었다. 다만 조사 표적의 개수에 따라 조사 표적을 상승시키기 위한 최소 유량의 변화는 형상 변화에 따른 항력에 의한 것으로 보이며 이러한 영향력을 고려할 수 있는 예측식을 유도하기 어렵다는 점을 또한 상기할 필요가 있다.

5. 계통 운전 유량

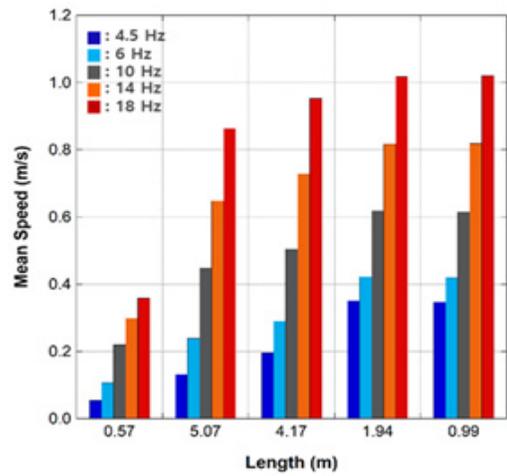
앞서 조사 표적 이송 속도에 따른 충격과 노심 삽입률 제한 조건을 고려하여 조사 표적의 장전과 인출 상황에 필요한 최소 유량 및 펌프 가동 시간을 살펴보았으며, 계통 운전 유량 변화에 따른 조사 표적 이송 거동을 파악함으로써 수력이송계통 운전 조건에 필요한 데이터베이스를 확보하기 위한 실험을 진행하였다.

조사 표적의 무게 120 g에 대해 인버터 펌프의 가동 주파수를 올려 계통 순환 유량을 증가시켰으며 곳곳에 설치된 광센서 신호로 장전 상황에서 조사 표적의 구간 별 이송 시간과 평균 속도를 측정하였다. Fig. 15는 조사 표적 개수에 따라 계통 유량 변화 시 조사 표적의 구간 별 이송 시간을 도시한 결과이며 이때의 조사 표적의 구간 별 평균 이송 속도는 Fig. 16에서 볼 수 있다. 동일한 조사 표적에 대해 인출 상황에서의 조사 표적의 이송 시간 및 이송 속도 측정 결과는 각각 Fig. 17과 Fig. 18에 도시하였다.

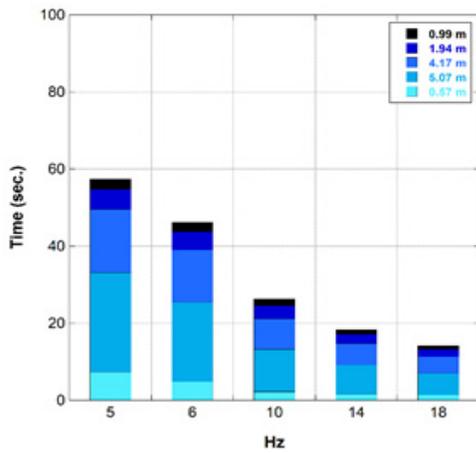
조사 표적의 장전 운전 상황에서 조사 표적이 조사관집합체에 도착할 때의 속도는 광센서 Z004와 Z005에서 측정된 시간 차이를 통해 유추하였으며 조사 표적의 무게와 유량 조건에 따른 조사 표적의 이송 속도 측정 결과는 다음 Fig. 19에서 확인할 수 있다. 수직한 배관에서 자유 낙하에 의한 조사 표적의 종단 속도와는 달리 일정 유속이 유지되는 조건에서는 조사 표적의 개수에 따라 이송 속도의 차이가 거의 발생하지 않았다. 또한 예측식을 통해 유추한 결과와 같이 유속과 조사 표적 이송 속도간의 선형 관계가 성립하는 것을 볼 수 있으며 예측 결과와 실험 결과가 거의 일치



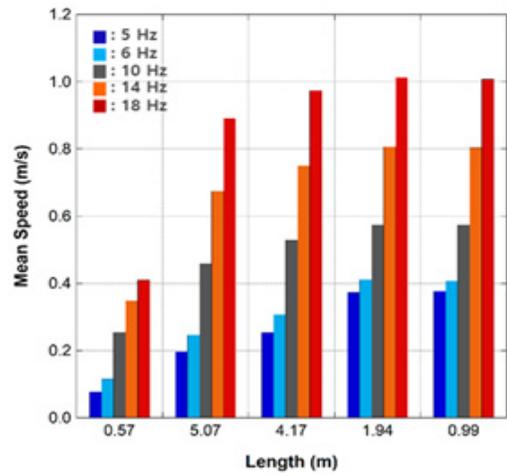
(a) one irradiation capsule



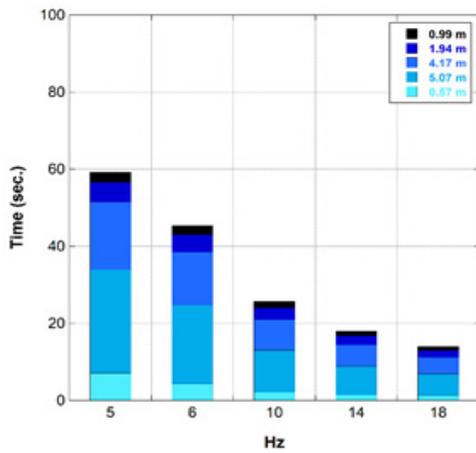
(a) one irradiation capsule



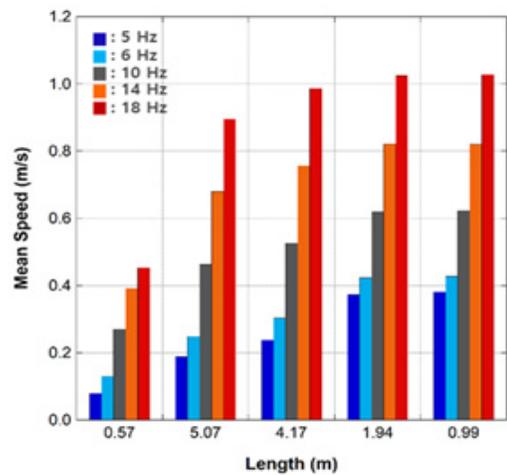
(b) two irradiation capsules



(b) two irradiation capsules



(c) three irradiation capsules



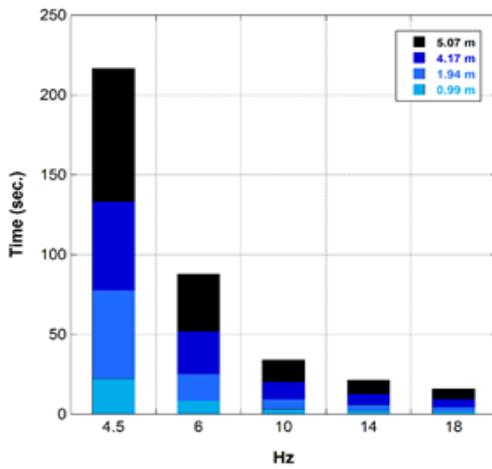
(c) three irradiation capsules

Fig. 15 Transport time for each section when loading the irradiation capsules

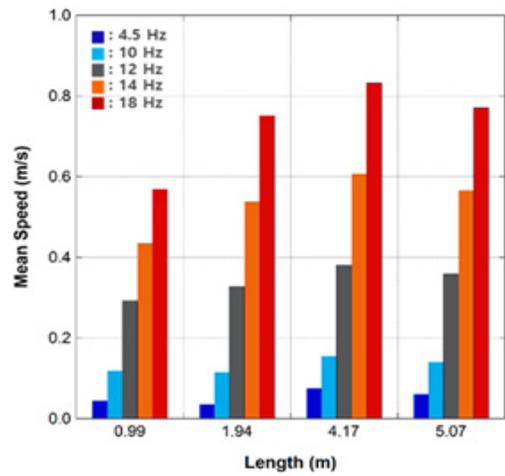
Fig. 16 Mean speed for each section when loading the irradiation capsules

하였다. 조사 표적을 인출하기 위한 운전 조건에서 조사관립 합체에 위치한 조사 표적의 이송 속도 역시 광센서 Z005와 Z004의 측정 시간 차이를 통해 예측하였으며, 다양한 조사 표적의 무게와 유량 조건에서 조사 표적의 이송 속도 측정 결과는 Fig. 20에 도시하였다. 조사 표적의 개수에 의한 차

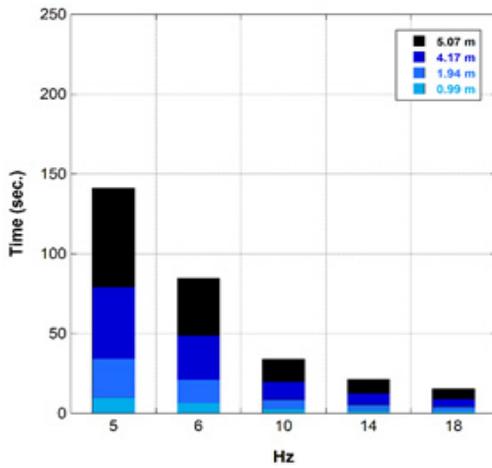
이는 발생하지 않았으며 유속과 조사 표적의 이송 속도 간의 관계가 선형성을 띠고 있음을 확인할 수 있으며, 예측식을 통한 결과와 실험 결과 사이의 오차가 매우 작았다.



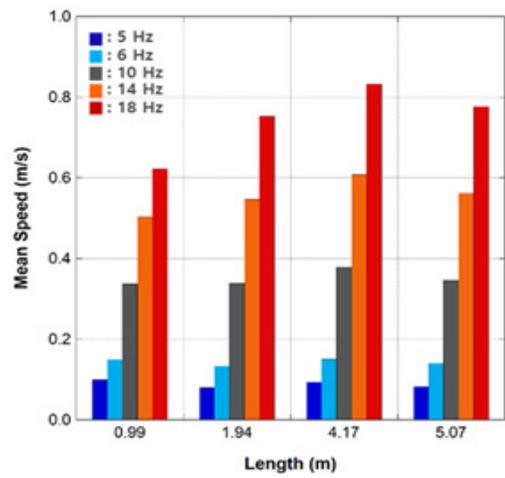
(a) one irradiation capsule



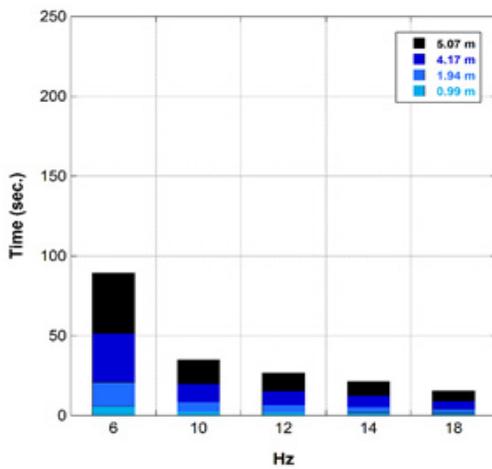
(a) one irradiation capsule



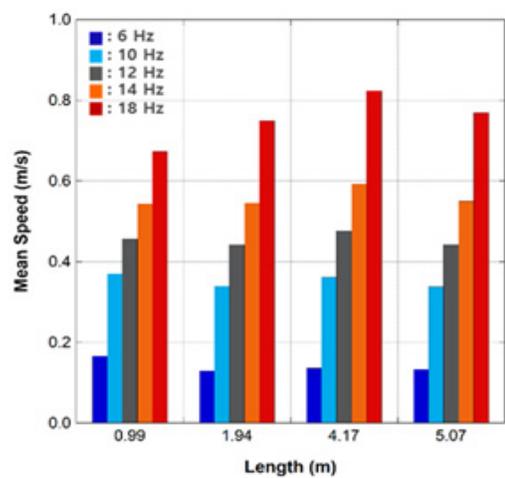
(b) two irradiation capsules



(b) two irradiation capsules



(c) three irradiation capsules



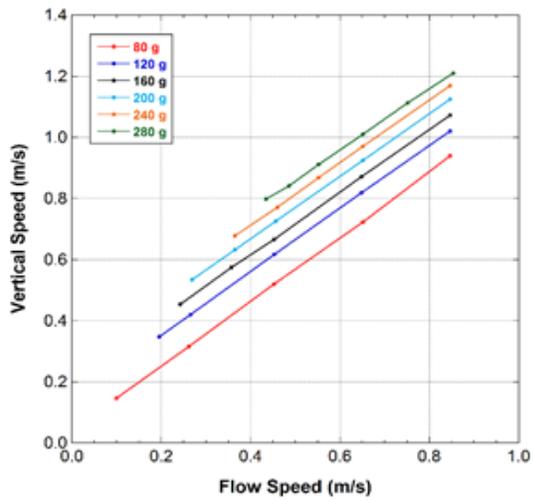
(c) three irradiation capsules

Fig. 17 Transport time for each section when loading the irradiation capsules

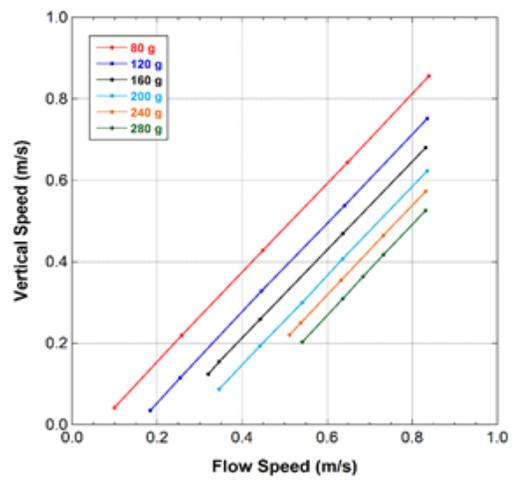
Fig. 18 Mean speed for each section when loading the irradiation capsules

한편 진행하였던 계통 순환 유량이 약 0.3~2.3 m³/h 범위였으며 이때 조사 표적 이송 배관에서의 유속은 약 0.1~0.84 m/s였다. 이러한 펌프 운전 조건에서 무게 80~280 g

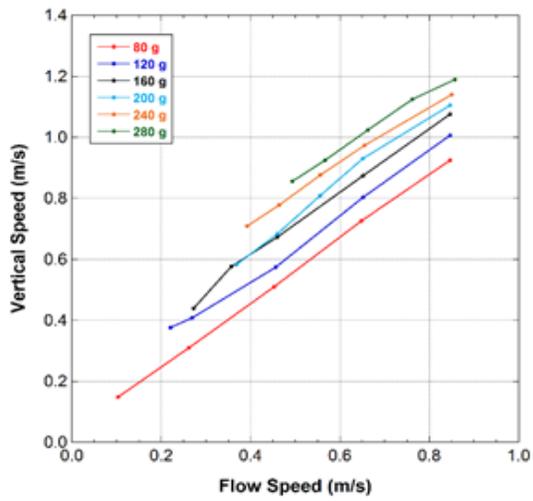
인 조사 표적을 장전하는데 소요되는 총 시간은 약 18~125초 정도였고 조사 표적을 인출하는데 필요한 시간은 약 20~240초 정도였다.



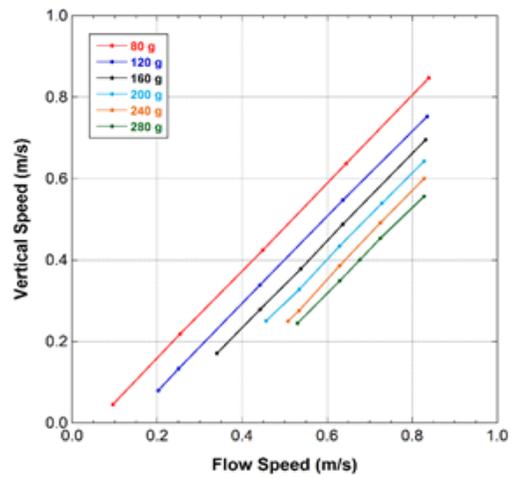
(a) one irradiation capsule



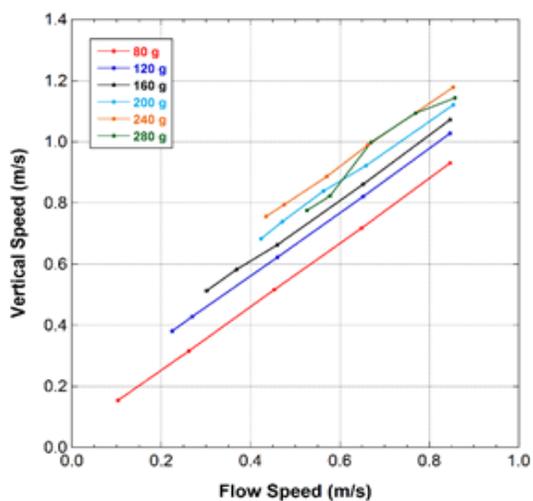
(a) one irradiation capsule



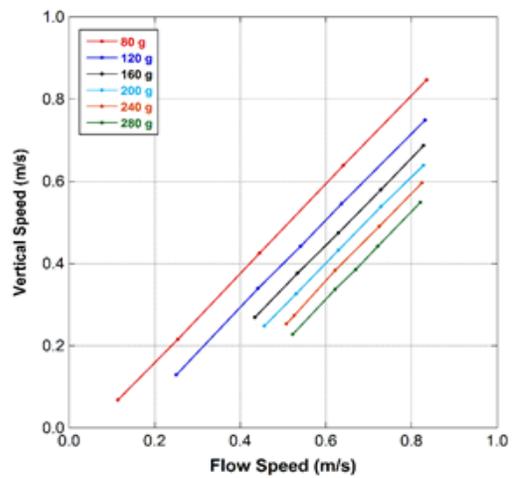
(b) two irradiation capsules



(b) two irradiation capsules



(c) three irradiation capsules



(c) three irradiation capsules

Fig. 19 Transport time for each section when loading the irradiation capsules

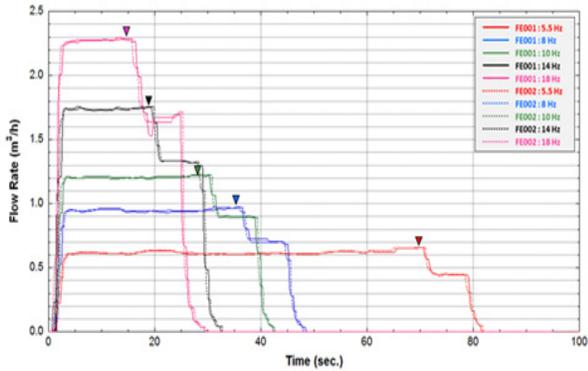
Fig. 20 Transport time for each section when loading the irradiation capsules

6. 운전 상황 모니터링

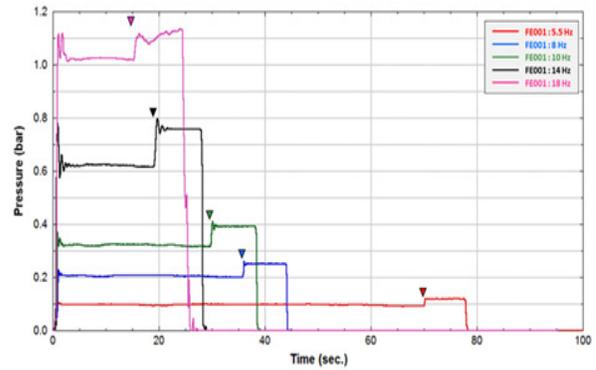
수력이송계통의 배관은 수조 안에 설치되며 조사 표적은 배관 내부에서 이송되기 때문에 조사 표적의 이송 상황을 파악할 수 있는 센서가 필요하게 된다. 조사 표적의 장전 시 조사 표적이 조사관집합체에 도달하게 되면 계통 유로가 급격히 좁아지게 되고 인출 과정에서도 조사 표적이 표적이송 스테이션에 도착하는 순간 유로 면적이 좁아져 계통 저항이

증가하게 될 것이다. 따라서 별도의 기기실에 설치될 예정인 유량계와 차압계 또는 압력계를 이용하여 조사 표적 이송 완료 시점을 감지할 수 있을 것이며 이때 계측 신호의 변화 수준을 파악하기 위한 실험을 진행하였다.

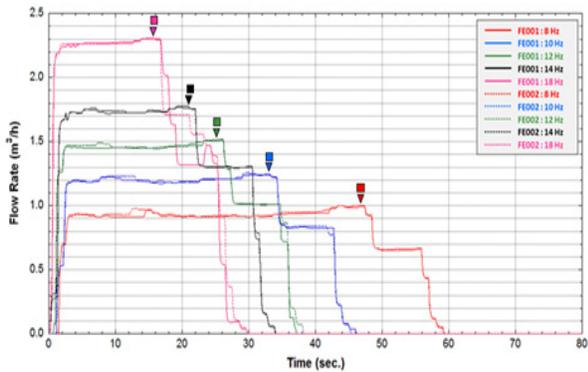
개당 무게가 160 g인 조사 표적이 조사관집합체에 장전되는 동안 펌프 전단(FE001)과 후단(FE002)에서의 유량을 측정하였으며 그 결과는 Fig. 21과 같다. 조사 표적이 조사관집합체에 도착하는 순간 유로가 좁아져 유량이 감소하게 되며, 이때 유량 감소량은 계통 순환 유량에 따라 달라졌으



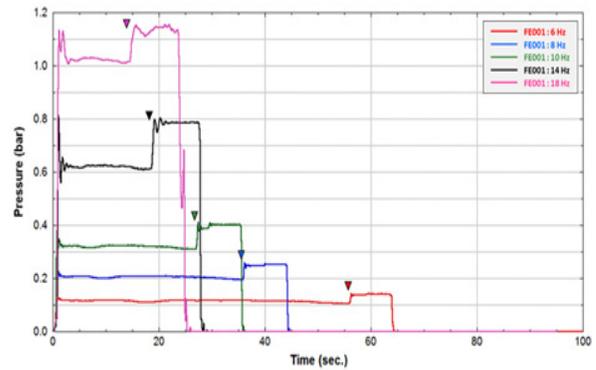
(a) one irradiation capsule



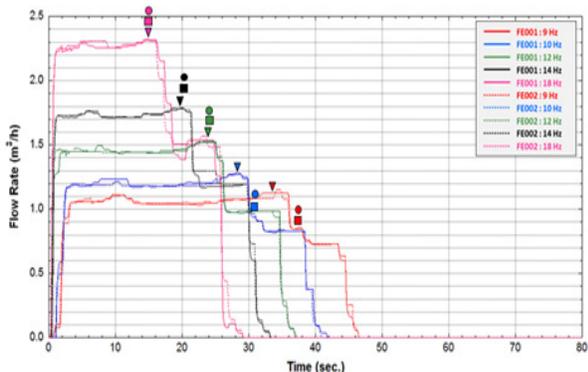
(a) one irradiation capsule



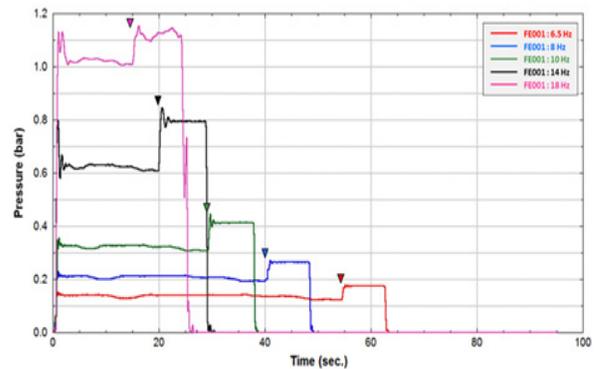
(b) two irradiation capsules



(b) two irradiation capsules



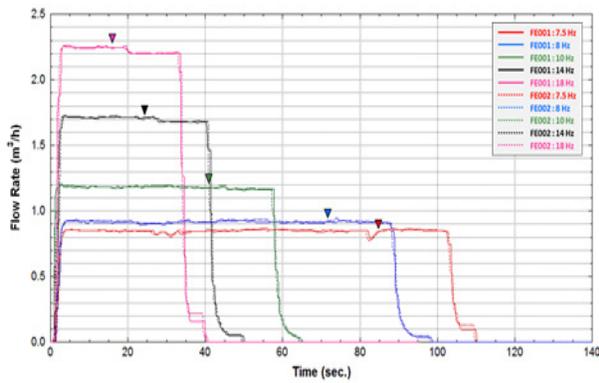
(c) three irradiation capsules



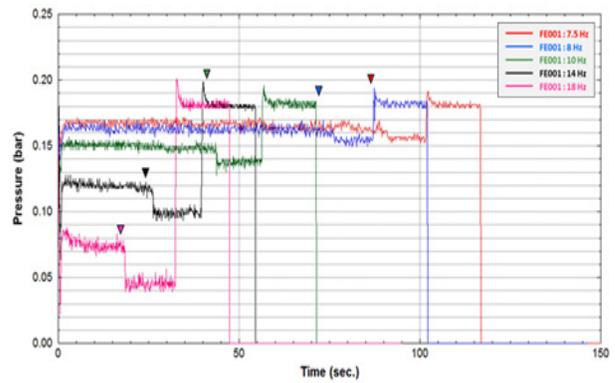
(c) three irradiation capsules

Fig. 21 Flow rate history when loading the irradiation capsules (160 g), ▼ : arrival of the first irradiation capsule, ■ : arrival of the second irradiation capsule, ● : arrival of the third irradiation capsule,

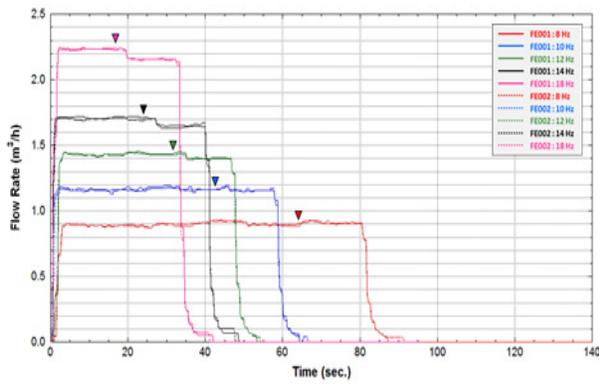
Fig. 22 Pressure difference history when loading the irradiation capsules (160 g), ▼ : arrival of the first irradiation capsule



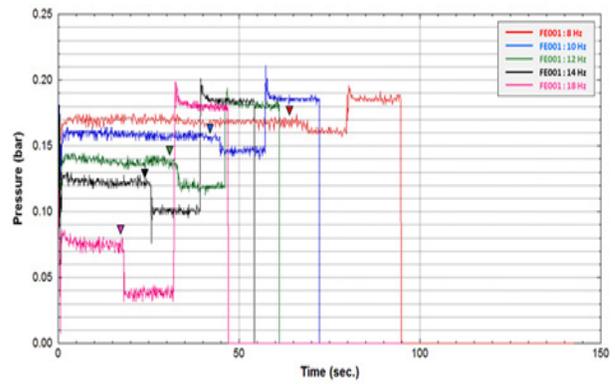
(a) one irradiation capsule



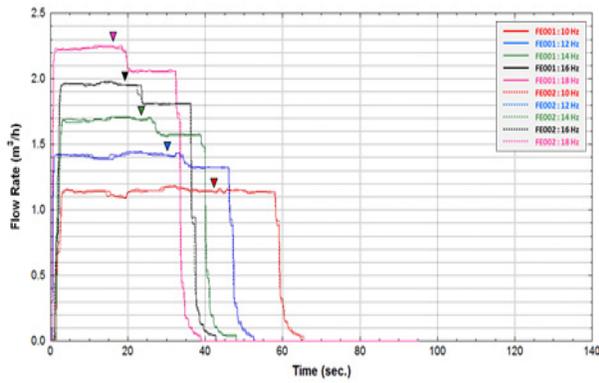
(a) one irradiation capsule



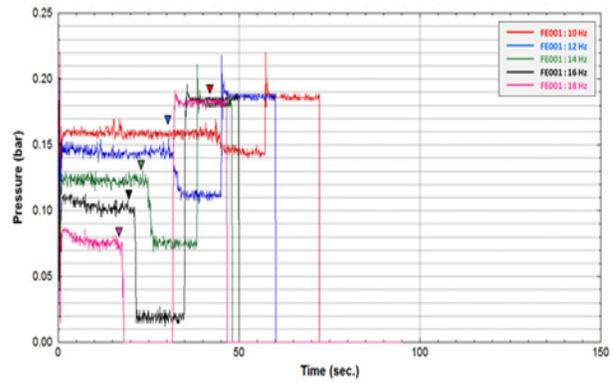
(b) two irradiation capsules



(b) two irradiation capsules



(c) three irradiation capsules



(c) three irradiation capsules

Fig. 23 Flow rate history when unloading the irradiation capsules (160 g), ▼ : arrival of the first irradiation capsule

Fig. 24 Pressure history when unloading the irradiation capsules (160 g), ▼ : arrival of the first irradiation capsule

나 대략 25~28 % 정도의 비율로 변동이 생겼음을 확인할 수 있었다. 조사 표적이 2개 또는 3개가 이송되는 도중에 약간의 유량 섭동이 존재하였고 Fig. 21(c)와 같이 간혹 조사 표적이 동시에 이송되지 않는 경우가 발생하였고 이로 인해 다단으로 유량이 감소하는 형태를 보이기도 하였다.

Fig. 22는 조사 표적이 장전되는 동안에 측정된 차압 변화량으로 조사 표적이 조사관집합체에 도착하게 되면서 발생하는 계통 저항에 의한 것이다. 차압 증가량을 통해 조사 표적이 조사관 집합체에 도착하는 것을 감지할 수 있을 것

이나 이전에서 살펴본 유량과는 달리 순간적인 차압 증가량이나 비율이 계통 유량에 따라 일정하지 않았다.

Fig. 23은 개당 무게 160 g인 조사 표적을 조사관집합체에서 인출하는 동안 측정된 유량 결과이다. 조사 표적이 표적이송스테이션에 도착하는 순간 유로를 좁게 형성하는 것은 장전하는 상황과 동일하나 표적이송스테이션의 완전히 기밀 유지하지 못해 계통 유량의 손실이 일어나는 이유로 유량 감소량이 뚜렷하게 보이지 않았다.

조사 표적을 조사관집합체에서 인출하는 운전 상황에서

조사 표적의 표적이송스테이션 도착 여부를 판단할 수 있는 계측 신호 중 펌프 후단에 설치한 압력계(P003)를 이용하였다. 이때 측정한 압력 변화는 Fig. 23에 도시하였으며 조사 표적이 표적이송스테이션에 도착하는 순간의 압력 강하량과 강하비율이 유량에 따라 상이하였으나 유량과 압력 강하량이 비례하는 것을 확인할 수 있었다. 표적이송스테이션은 초기에 조사 표적을 계통 내부에 장착하고 조사가 완료된 이후에 조사 표적을 꺼내야 하는 구조인 탓에 완전 기밀을 유지하기 힘든 구조물이다. 이러한 이유로 유량 손실이 발생하게 되고 조사 표적의 장전 운전과 비교하여 조사 표적이송 완료 시 벌어지는 계통 유량 변화가 계통 저항 변화가 작아 민감도가 좋은 계측기가 필요할 것으로 보인다.

7. 결 론

수력이송계통의 원활한 운영을 위한 설계 변수를 확정하기 위한 실험을 진행하였다. 조사 표적의 이송 속도를 원하는 수준으로 제어하기 위해 예측식을 유도하였고 이를 통해 원하는 수준으로 조사 표적의 이송 속도를 제어할 수 있는 배관의 크기를 선정하였다. 실험 루프를 구축하여 수력이송 계통 운전 조건을 찾기 위한 다양한 데이터 베이스를 확보하였고 이를 기반으로 추후 적정 펌프 용량을 산정하고 운

전 전략을 세울 수 있을 것으로 기대한다. 한편 실험 결과를 토대로 이론식을 검증하였으며 복잡한 현상이 얽혀 있어 정확한 예측은 불가능하지만 초기 설계 단계에서 대략적인 범위를 판가름할 수 있는 근거로서 예측식의 유용성을 찾을 수 있다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No. 2020M2C1A1061043).

References

- (1) Taehong Kim, Joonho Jeong, Jongmin Lee, Jinho Oh, Wonjung Kim, 2016, "Hydrodynamic control of the velocity of a capsule carried by liquid in a vertical pipe," Journal of the Korean Society of Visualization Spring Meeting, pp. 64-67.
- (2) Taehong Kim, Ryeol Park, Joonho Jeong, Wonjung Kim, 2019, "Transport a capsule immersed in a vertical pipe," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 17, No.1, pp. 19-25.