

초음파 진동이 관내 강제대류 유동의 열전달 증진에 미치는 영향

정 지 환[†]

백석대학 보건환경과

The Effect of Ultrasonic Vibration on Heat Transfer Augmentation of Forced Convective Flow in Circular Pipes

Ji Hwan Jeong[†]

Baekseok College, Department of Environmental System

요 약

관내부로 흐르는 물에 초음파 진동을 가진 하였을 때 관내 열전달이 증진되는 효과를 실험 및 수치해석을 통해 연구하였다. 원형관 벽면에서 관내부로 흐르는 물로의 대류열전달계수를 초음파 진동이 있을 때와 없을 때에 측정하였다. 이 결과를 비교함으로써 초음파진동이 전열성능 향상에 미치는 영향을 정량화하였다. 이러한 현상에 영향을 줄 수 있는 유량과 온도의 범위를 넓히기 위하여 수치해석을 수행하였다. FLUENT 6.1을 이용하여 관내의 유동장과 온도분포를 해석하고 초음파 진동 유무 시 대류 열전달계수를 평가하였다. 연구결과 초음파진동이 강제대류 조건에서 전열성능을 향상시키며 그 영향은 관내를 흐르는 물의 유량에 따라 크게 변한다는 것을 보여주고 있다.

주요어: 초음파, 열전달 촉진, 강제대류, 중수로 압력관

Abstract — Augmentation of heat transfer by ultrasonic vibration in pipes are investigated. Measurements of convective heat transfer coefficients on circular pipe walls are made with and without ultrasonic vibration applied to water. These data are compared with each other to quantify the effects of ultrasonic vibration on heat transfer enhancement. Numerical analysis has been also performed in order to extend the ranges of examined temperature and flow rate. FLUENT Ver.6.1 is used to simulate velocity and temperature fields and evaluate heat transfer coefficient with and without ultrasonic vibration. The results show that the ultrasonic vibration enhances the Nusselt number of forced convection flow and the increase rate strongly depends on flow rate.

Key words: Ultrasonic vibration, Heat transfer augmentation, Forced convection, CANDU pressure tube

1. 서 론

가압형 중수로인 CANDU 원자로에서는 사용기간이 증가함에 따라 압력관이 변형되어 연료봉 다발이 압력관 가까이로 밀착되는 현상이 보고되고 있다. 이러한 현상은 원자로의 열적 여유도를 감소시키게 되므로 열적 여유도를 크게 하기 위해서는 전열성능을 향상시킬 필

요가 있다. 열전달을 촉진시키기 위해 여러 가지 방법들이 적용되고 있는데, 크게 수동적인 방법과 능동적인 방법으로 나눌 수 있다. 수동적 방법에는 열전달 면적의 확대, 홈 제조, 배관경의 축소 등을 포함하며 능동적인 방법은 전기장 및 자기장, 진동 그리고 초음파 등을 포함하고 있다. 수동적 방법은 기계적 가공 상의 어려움과 획기적인 기술 향상을 기대하기 어려우므로 최근 수동적 방법과 더불어 능동적 방법을 적용시키는 복합 열전달 촉진연구가 활발히 연구되고 있다^[1]. 현재 원자력발전소 연료에는 난류생성 핀 설치 등의 설계가 이미 반영되어 있고, 전자기장은 사용할 수 없다. 따라서 다

[†]To whom correspondence should be addressed.
Baekseok College, Department of Environmental System
Tel: 041-550-0649
E-mail: jhjeong@bsc.ac.kr

른 방법을 이용하여 전열성능을 향상시킬 수 있는 방법을 개발한다면 CANDU 원자로의 열적 여유도를 제고할 수 있을 것으로 판단된다.

냉각수에 초음파 진동을 가하여 전열성능을 향상시키려는 연구는 다수 시도되었다. Nomura^[2]는 초음파에 의한 열전달계수의 증가는 acoustic streaming과 cavitation의 영향으로 나눌 수 있다는 결론을 도출하였다. 좁은 표면에서 캐비테이션에 의한 열전달 계수의 증가는 열전도도의 증가로 설명할 수 있으며 이것은 마이크로젯 흐름을 야기시킨다고 하였다. 또, 캐비테이션에 의한 열전달 계수의 증가는 비록 폭이 줄더라도 나타났고, 초음파의 적용은 전 자연대류영역에 적용가능하며 작은 Re수 영역에서 증가가 크다는 것을 보였다. Yamashiro 등^{[3][4]}은 얇은 열선이 급속 냉각될 동안 초음파 진동이 열전달에 미치는 영향에 관한 연구를 실험적으로 수행하였다. 이 논문에서 초음파 진동자의 입력전압과 주파수가 열전달 향상에 미치는 영향, 그리고 액체내에서 음압(sound pressure)과 캐비테이션 밀도가 열전달 향상에 미치는 영향에 대해 보고하였다. Nomura & Murakami^[5] 등은 주파수 변화에 대한 초음파로 인한 열전달 영향에 관한 연구를 28, 45, 100 kHz의 주파수로 수행하였다. 열전달계수는 standing wave의 영향을 받는 진동의 거리에 따라서 주기적으로 바뀌며 진동주파수가 크고 주기가 짧을수록 열전달 계수는 향상된다고 하였다. Wong & Chon^[6], Park & Bergles^[7] 등은 대류열전달, 핵비등 영역에서 초음파가 열전달에 미치는 영향을 연구하였다. 이들은 대류열전달 영역에서 초음파 진동을 가하여 열전달을 측정하면 열전달계수가 크게 증가한다고 밝히고 있다. 이들의 연구는 모두 실험의 편의를 위해 물이 아닌 냉매를 사용하여 수행되었다. 한편, 이러한 기술을 원자력발전소에 적용해보려는 노력은 Ohtake 등^[8]에 의해서 한 차례 있었다. 이들은 초음파 진동을 PWR의 압력용기 외 벽냉각 성능증진에 활용 가능한지 여부를 알아보기 위해 R-113 수조에서 실험을 수행하였다. CANDU형 원전을 포함하여 그 외에 원전에 초음파를 이용한 열전달 촉진 기술을 적용하려는 시도는 문헌에서 찾을 수 없다. 또한 이들 연구는 모두 수조비등 조건에서 수행되었으며 강제대류 조건에서의 연구는 적다.

본 연구에서는 CANDU 원자로 압력관을 모의하는 장치를 제작하여 초음파를 가진 하였고 가진 하지 않았을 경우 초음파가 열전달 계수에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 또한 실험에 적용된 조건보다 적용 범위를 확장하기 위해 수치해석적 연구를 병행하였다. 상업용 CFD 코드인 FLUENT Ver.6.1^[9]로 유동장 및 온도장 해석을 수행하여 실험보다 넓은 범위에서 초음파 진동의 영향을 평가하였다.

2. 초음파 진동의 영향 실험

2-1. 실험장치 및 방법

Fig. 1과 Fig. 2는 실험장치 전체와 시험부의 개략도를 보여주고 있다. 시험부는 이중관 구조의 대향류 열교환기 형태로 제작 되어 있으며 실험에 사용된 1차측과 2차측 작동유체로는 증류수를 사용하였다. 이중관 구조의 내부관에는 1차 유체로 냉수가 흐르고 내부관과 외부관 사이의 환형부에는 2차 유체로 온수가 흐르도록 구성한다. 시스템은 냉수가 순환하는 냉수순환부와 시험부에 열유속을 인가하기 위한 온수 순환부, 초음파를 인가하는 초음파 발생기로 구성되어 있다. 냉수 순환부는 질량유량계, 압력계, 항온 수조로 이루어져 있다. 시험부에서 전달된 열량을 계산하기 위해 입구와 출구에 열전대를 설치하여 온도를 측정한다. 그리고 유체 흐름의 역 방향으로 초음파를 가진 한다. 온수 순환부는 시험부의 환형부를 통해 냉수외는 대향류로 흐르면서 냉수를 가열시키고 온수가 잃어버린 열량을 항온수조에서 재

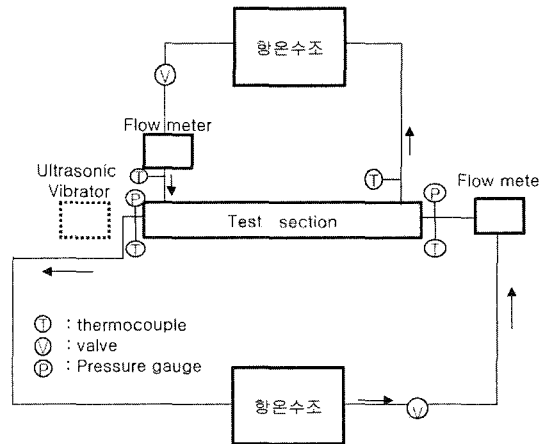


Fig. 1. Schematic diagram of test loop.

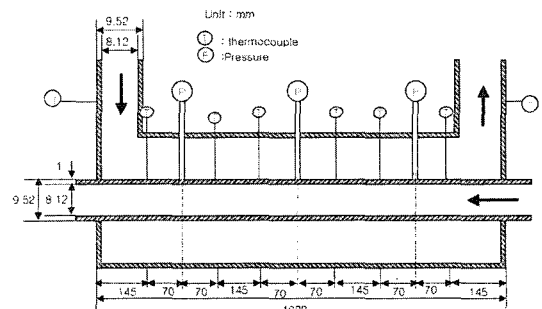


Fig. 2. Schematic diagram of test section.

가열하여 순환하는 폐회로로 구성된다. 온수 및 냉각수 순환부는 시험부에 들어가기 전과 후의 유체의 유량과 온도 및 압력을 측정한다. 항온수조는 Circulator 타입의 RBC-30을 사용하였다. 온도 제어는 Pt-100Ω 센서 및 P.I.D 제어기를 사용하였고 범위는 -25°C~110°C까지 설정 할 수 있다. 펌프는 Agitation & Circulation 타입을 사용하였으며 최대 유량은 25 lpm이다.

시험부의 내관은 CANDU 원자로 압력관 내부의 등가 수력직경(7.62 mm)을 고려하여 외경 9.52 mm, 내경 8.12 mm 길이 1000 mm인 수평 평활관을 사용하였다. 외관은 정사각형 모양의 조립된 관으로서 가로 세로 25 mm의 SUS 304를 사용한다. 시험부의 냉수측의 입·출구 온도 및 압력을 측정하기 위해 입구 및 출구에 T-type의 열전대와 압력계 model P-155를 사용한다. 내관 벽면의 온도를 측정하기 위해 관 외벽에 140 mm와 145 mm 간격으로 6곳에 오차 범위 ±0.1°C인 열전대를 설치하였다. 초음파 진동자는 공진주파수 27 kHz의 볼트조임 란지방 타입(BLT)을 이용하였다. 초음파는 단일진동자를 사용하여 내관의 냉수유체의 역방향으로 가진 시킨다. 시험부 각 위치에서의 온도, 압력, 유량 등의 신호는 NI사의 Terminal Block (SCXI-1303)과 Module(SCXI-1102)을 사용하여 PC로 읽히며 Lab View프로그램을 이용하여 관리된다. 실험에 사용된 모든 센서와 계측기는 Calibrator(CA100), 표준온도계, 고정도 항온수조, 전자저울 등을 이용하여 보정하였다.

2-2. 측정값 해석 및 결과

1차 유체로부터 2차 유체로 전달된 전열량은 측정부 입구와 출구에서 측정된 온도차를 이용하여 다음 식으로 계산된다. 이 때 물성치는 이 두 지점의 평균온도를 기준으로 구한다.

$$Q_1 = \dot{m}_{w,1} C_p \Delta T_{w,1} \tag{1}$$

$$Q_2 = \dot{m}_{w,2} C_p \Delta T_{w,2} \tag{2}$$

$$Q = (Q_1 + Q_2) / 2 \tag{3}$$

데이터 해석에는 위 두 열량의 평균값을 전열량으로 이용하였다. 실험에서 관내측 전열량과 관외측 전열량의 차이는 전체 실험구간에서 3% 이내로 일치 하였다. 이 평균 전열량을 이용하여 1차 유체측 열전달계수 및 Nusselt 수는 관내측 평균온도와 관벽에서의 평균온도를 이용하여 다음 식으로 계산된다.

$$k_w = \frac{Q}{A_1(T_{wall,avg} - T_{w,avg})} \tag{4}$$

$$Nu = \frac{h_w d_i}{k_w} \tag{5}$$

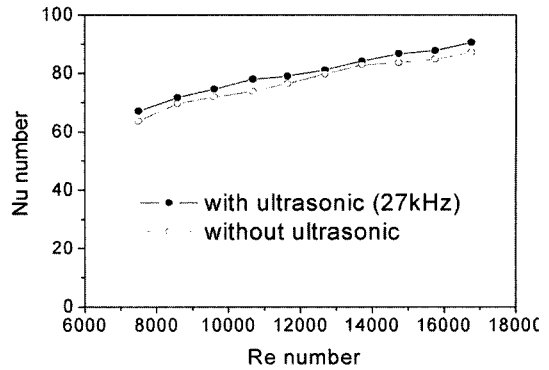


Fig. 3. Nu number measured with/without ultrasonic vibration.

실험 결과로 제시될 Nu 수는 실험에서 측정되는 온도와 유량 값으로부터 계산된다. 실험에 사용된 온도와 유량 계측기는 각각 ±0.1°C와 0.5%의 오차범위를 가지며 이러한 오차로 인해 계산된 Nu 수도 오차를 가지게 된다. 오차전파(error propagation) 해석을 이용한 결과 Nu 수의 uncertainty는 ±2% 이내인 것으로 평가되었다.

초음파에 의한 관내측 열전달 촉진 정도를 알아보기 위해서 내관의 냉각수에 초음파를 가진했을 때와 하지 않았을 때의 열전달계수를 측정하였다. 초음파를 가진 하였을 때와 하지 않았을 때의 Nu 수를 Fig. 3에 나타내었다. Re수가 7000에서는 5%, 10000에서는 5.4%, 16000에서는 약 4.5%의 증가율을 나타내는 등, 평균 약 5%의 증가율을 보였다.

Fig. 3은 수조비등에서 뿐만 아니라 강제대류 조건에서도 초음파 진동이 전열성을 향상시킬 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 열전달 촉진 성능은 수조비등보다 효과가 적은 것으로 나타났다. 즉, 기존의 연구자들이 수조비등조건에서 수행한 연구결과에서는 냉매의 종류, 초음파 진동수, 과냉각도에 따라 전열량으로 최대 800%, 열전달 계수로는 150%까지 증가한다고 보고하였다^{[5][6][8]}. 수조비등에서보다 강제대류 조건에서 열전달 촉진에 미치는 초음파 진동의 영향이 줄어든 이유는 초음파 진동에 의한 유인유동(induced flow) 이 상대적으로 작아졌기 때문으로 이해된다. 즉, 자연대류가 일어나는 수조비등에서는 유인유동에 의한 유속의 영향이 크지만 강제대류에서는 그 영향이 상대적으로 감소하기 때문이다. 이에 대한 정확한 평가를 위해서는 더 자세한 연구가 필요하다.

3. 초음파 진동 영향에 대한 수치해석

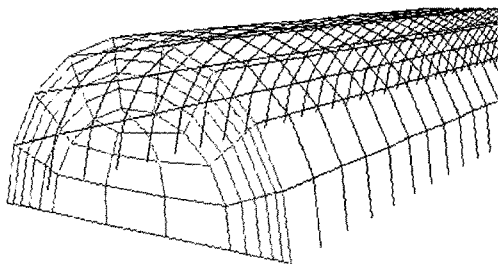
CANDU 원자로 압력관의 운전조건은 본 실험에서 사

용된 조건보다 고온 고압이며 유량이 매우 커서 본 실험에서 구현하기가 어렵다. 이러한 조건에서 초음파 진동이 전열 성능에 미치는 영향을 예측하기 위해 상용 CFD 코드를 이용하여 해석한다. 먼저 실험조건에 대한 해석을 수행하여 사용된 CFD 코드의 초음파 진동을 고려한 전열성능 해석성능을 평가하고, 다음에 CANDU 원자로 운전조건과 같은 고온, 고유량 조건에서의 전열성능에 대한 초음파 진동의 영향을 해석하였다.

3-1. 수치해석 모델

CFD 프로그램으로는 검사 체적에 기초한 유한차분방법을 이용하는 상용 코드인 FLUENT를 사용하였다. FLUENT는 범용 CFD 코드로서 난류유동, 비정상상태 해석, 다양한 열전달 해석, 화학반응 유동, 다상유동 등 다양한 물리적 현상을 해석할 수 있다. 격자와 격자 사이 경계면에서의 일반중속변수 값을 정하는 데에는 upwind scheme을 사용하였으며, 유동장제산시 연속방정식과 운동방정식을 연립하여 푸는 과정에서 발생하는 압력과 속도의 연계 문제는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 난류모델로는 Reynolds stress 로 인한 acoustic streaming 을 모의할 수 있도록 Reynolds Stress Model(RSM)을 사용하였다. 실험 내용을 해석하기 위하여 실험에 사용된 시험부를 3-D로 모델하였다. 내경 8.12 mm의 작은 수평관에서의 단상 강제대류 유동을 모의하므로 중력은 무시하였고, 대칭경계조건을 이용하여 내관의 상부 절반을 모델하였다. 전열관 벽면 근처에서는 유속변화율이 크므로 메쉬 간격을 작게하고 전열관 중심부는 메쉬 간격이 크도록 하였다. Fig. 4에 해석에 사용된 메쉬의 일부를 나타내었다. 생성된 셀 수는 약 50000개이다.

초음파 진동은 파이프 끝 면에 dynamic mesh 모델을 적용하여 모의하였다. 즉, 파이프의 끝 면은 27 kHz의 주기로 축방향으로 움직이게 된다. 진폭은 초음파 진동자 제작업체에서 제공한 8 μ m로 설정하였다. 진동은 매 시간간격에서 5%씩 진행하도록 하였으므로 한 사이



Y

Fig. 4. 3D mesh model for numerical analysis.

Table 1. Simulated boundary conditions.

Mass flow (kg/m ² s)		500	1447	4000	6807
T _{wall} (°K)	T _{w, l, in} (°K)				
318.15	283.15		0, 27*		
373.15	313.65		0, 27		
473.15	413.65		0, 27		
599.15	539.65	0, 27	0, 27	0, 27	0, 27, 40**

*실험조건.

**CANDU 원자로 압력관 운전조건.

클을 모의하기 위해서는 72 time step 을 계산해야 한다.

3-2. 경계조건 및 해석 결과

앞선 실험결과에서 발견된 결과를 넓은 영역에서 확인하기 위하여 다양한 경계조건에서의 해석을 수행하였다.

Table 1에 비교해석을 위해 수행된 모든 경우를 정리하여 나타내었다. 표에 나타난 0, 27, 40 등의 숫자는 각각 초음파 진동이 없는 경우, 실험과 같이 27 kHz 진동이 있는 경우, 그리고 가상의 40 kHz 진동이 있는 경우를 나타낸다. 1차측(내관)을 흐르는 유량을 500~6807 kg/m²s 범위에서 변화시키며 해석을 수행하였다. 이 때, 1447 kg/m²s는 실험에서 Reynolds 수 10000에 해당하는 유량이고, 6807 kg/m²s는 CANDU 원자로 압력관의 유량에 해당한다. 내관 벽면 온도(T_{wall})와 1차측 냉수의 입구온도(T_{w, l, in})도 실험에서 사용된 온도와 CANDU 원자로 압력관의 온도 사이에서 변화시켰다. 이 때 T_{wall}과 T_{w, l, in}의 차이는 CANDU 원자로 연료봉과 냉각수의 온도차와 같도록 설정하였다. 실험에서의 내관 벽면온도는 축방향을 따라 변화하겠지만, 본 해석에서는 평균 상수 값으로 가정하였다.

CFD 해석에서 초음파 진동 한 사이클은 72 time step 을 진행시켜야 모의가 되므로, 1초에 해당하는 27,000 사이클을 모의하는 데에는 CPU 사용시간이 매우 크게 소요된다. 이 시간을 제한하기 위해 모의된 사이클 수와 물리량 변화와의 관계를 비교 검토한 선행 연구결과를 참조하였다. Kim & Jeong^[10]은 초음파가 가진된 수조비동을 FLUENT 로 해석하면서 사이클 수 증가에 따른 온도 표준편차의 변화를 검토하였다. 사이클 수가 증가함에 따라 변화폭이 감소하여 200 사이클을 모의하면 결과가 수렴하는 경향을 보인다고 하였다. 이 결과에 여유도를 고려하여 본 해석에서는 400 사이클을 모의하였다.

Fig. 5는 실험조건을 해석한 결과로서 내관의 중심평면과 출구에서의 유속분포와 온도분포를 보여주고 있다. 이 결과는 초음파 진동이 없는 경우에 대해서 해석한 결과이며 물리적으로 타당한 분포를 보이고 있다. 초음파

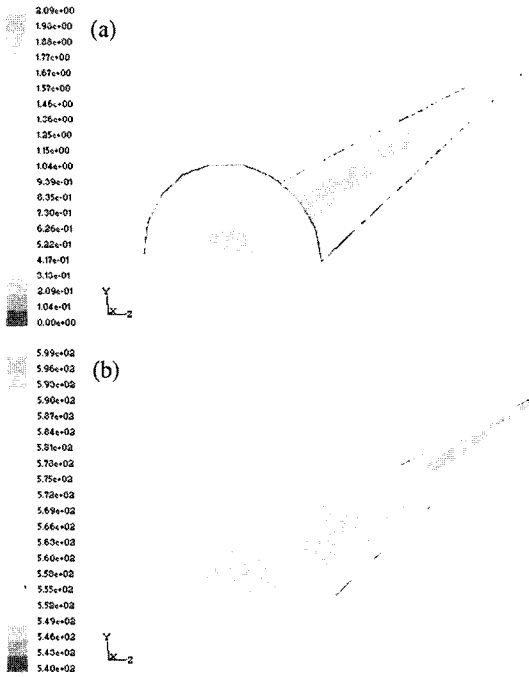


Fig. 5. Contours of (a) velocity and (b) temperature.

진동이 없는 경우와 있는 경우를 해석했을 때 Nu 수가 각각 86.9과 93.4로 계산되었다. 이 값은 실험에서 측정된 72.9와 76.3에 비해 약 20% 큰 값이다. 이는 실험에서 2차측 온수의 온도가 상류로 갈수록 점차 낮아지는 것을 CFD 해석에서는 벽면온도를 2차 온수 입구온도로 일정하게 경계조건을 사용하였기 때문이다. 한편, Nu 수 증가율도 해석결과(7%)가 실험결과(5%)보다 약간 크게 나오는데, 이는 해석에서는 초음파 진동자의 진폭을 진동자의 설계 최대값을 사용하였으므로 초음파 진동의 영향이 최대로 반영된 결과이다. 이러한 결과로부터 FLUENT Ver.6.1이 초음파 진동이 가해진 실험결과를 적절히 모의하고 있으며, 넓은 범위에서 초음파 진동이 전열 성능에 미치는 영향을 정성적으로 평가하는데 유용할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 1차측 유량을 실험조건에 해당하는 1447 kg/m²s로 설정하고 관벽면과 1차측 냉각수의 입구온도를 변화시키며 해석한 결과를 보여주고 있다. 이러한 온도의 변화는 Nu 수 증가율에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다. Fig. 7은 1차측 냉각수 입구온도와 관벽면 온도를 CANDU 원자로 운전조건과 같도록 하고 유량을 변화시키며 해석한 결과로부터 Nu 수 증가율을 제시한 그림이다. 강제대류 조건에서도 초음파 진동이 전열면에서의 열전달 성능을 향상시키는데 기여하고 있음을 알

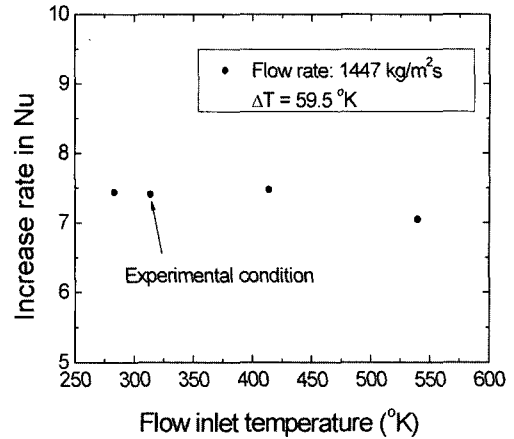


Fig. 6. Effect of coolant temperature.

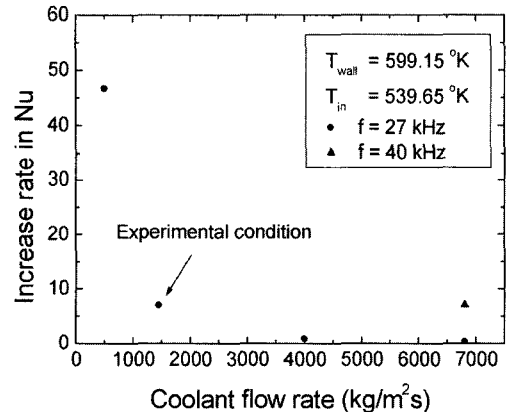


Fig. 7. Effect of coolant flow rate.

수 있다. 동시에 유량이 증가함에 따라 Nu 수 증가율이 급격히 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이는 유량이 최소가 되는 자연대류조건에서 열전달 촉진 효과가 극대화되는 것으로 해석되며, 이 결과는 열전달 계수가 50~150% 증가한다고 보고한 Nomura^[2], Wong & Chon^[6], Park & Bergles^[7] 등의 실험결과와 부합된다. 이러한 결과를 종합해 볼 때, 냉각수에 가해진 초음파 진동은 유량이 적을수록 열전달 촉진 효과가 커지며, 유량이 증가하면 그 효과가 감소된다고 말할 수 있다. 한편, Fig. 7을 보면 진동자의 주파수를 40 kHz로 높인 결과 Nu 수 증가율이 크게 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 진동 주기가 짧을수록 열전달 계수가 증가한다는 Numura & Murakami^[5]의 실험결과와 같은 경향을 보이는 것이다. 그러나 그 영향을 정량화하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

원형관에 강제대류로 흘러가는 냉각수에 가해진 초음파 진동이 관 벽면에서의 전열성능을 향상시키는지 알아보기 위한 연구를 수행하였다. 직경 8.12 mm인 파이프로 시험부를 제작하였으며 공진주파수가 27 kHz인 초음파 발진기를 사용하였다. 또한 고온, 고유량 조건에서도 초음파 진동이 전열성능을 향상시키는지 확인하기 위하여 상용 CFD 프로그램인 FLUENT Ver.6.1을 사용하여 실험조건을 포함한 넓은 범위의 온도 및 압력 조건에서 초음파 진동의 유무 시 유동 및 온도장을 해석하였다. 본 연구를 통하여 같은 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 기존 연구에서 밝혀진 자연대류 영역에서 뿐만 아니라 강제대류 조건에서도 냉각수에 가해진 초음파 진동이 열전달을 촉진시킴을 확인하였다.
2. 냉각수의 입구온도 변화는 Nu 수 증가율에 미치는 영향이 크지 않았다. 그러나 관내를 흐르는 냉각수의 유량이 증가할수록 Nu 수 증가율은 큰 폭으로 감소하였다. 즉, 초음파 진동을 이용한 열전달 촉진 효과는 유량이 증가함에 따라 감소하고 있다.
3. 진동주파수를 27 kHz에서 40 kHz로 증가시키면 열전달 촉진 효과가 커지는 것으로 해석결과가 나타났다.
4. 이러한 결과로부터 증수로 압력관 내부의 전열성능을 향상시키는데 초음파진동을 활용하는 것이 가능한 것으로 판단된다. 그러나, 최적 주파수와 출력을 찾고 설치방법을 찾는 등 실험으로 보다 더 검증될 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2003년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력기술기초연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

사용기호

A	: 전열관의 전열면적
d	: 전열관의 직경
h	: 대류 열전달계수
k	: 전도 열전달계수
Nu	: Nusselt 수
Q	: 전열량
Re	: Reynolds 수

T : 온도

아래첨자

1	: 1차측
2	: 2차측
avg	: 평균
in	: 입구
w	: 물
wall	: 전열벽면

참고문헌

1. Bergles, A.E.: "Enhancement of pool boiling", Int. J. Refrig., 20, 545 (1997).
2. Nomura, S. *et al.*: "Heat transfer enhancement by ultrasonic vibration", ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference-Proceedings New York, 4, 275, 18 refs (1995).
3. Yamashiro, H., Takamatsu, H. and Honda, H.: "Effect of ultrasonic vibration on transient boiling heat transfer during rapid quenching of a thin wire in water", Trans. ASME, 120, 282 (1998).
4. Yamashiro, H., Takamatsu, H. and Honda, H.: "Enhancement of cooling rate during rapid quenching of a thin wire by ultrasonic vibration", Heat Transfer Japanese Research, 27, 16 (1995).
5. Nomura, S. *et al.*, "Effect of changes in frequency of ultrasonic vibrations on heat transfer", Heat Transfer Asian Research, 27, 358 (2000).
6. Wong, S.W. and Chon, W.Y.: "Effects of ultrasonic vibration on heat transfer to liquids by natural convection and by boiling", AIChE J., 15, 281 (1969).
7. Park, K.A. and Bergles, A.E.: "Ultrasonic enhancement of saturated and subcooled pool boiling", Int. J. Heat Mass Transfer, 31, 664 (1988).
8. Ohtake, K.: "Study on the depression of incipient boiling temperature and the enhancement of critical heat flux induced by ultrasonic wave on horizontal plate facing upward and downward", ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference-Proceedings San Diego (1999).
9. FLUENT version 6.1, User's Manual, FLUENT. Inc.
10. Kim, H.J. and Jeong, J.H.: "Numerical analysis of experimental observations for heat transfer augmentation by ultrasonic vibration", Int. Symp. on Advances in Computational Heat Transfer, Norway (2004).