

연구용 원자로 냉각계통의 ASME 스트레이너 설계 및 성능시험

박 용 철* · 박 종 호**

Design and Test of ASME Strainer for Coolant System of Research Reactor

Yong-Chul Park*, Jong-Ho Park**

Key Words: ASME T-type Strainer (ASME T형 스트레이너)

ABSTRACT

The ASME strainers have been newly installed at the suction side of each reactor coolant pump to get rid of the foreign materials which may damage the pump impeller or interfere with the coolant path of fuel flow tube or primary plate type heat exchanger. The strainer was designed in accordance with ASME SEC. III, DIV. 1, Class 3 and the structural integrity was verified by seismic analysis. The screen was designed in accordance with the effective void area from the result of flow analysis for T-type strainer. After installation of the strainer, it was confirmed through the field test that the flow characteristics of primary cooling system were not adversely affected. The pressure loss coefficient was calculated by Darcy equation using the pressure difference through each strainer and the flow rate measured during the strainer performance test. And these are useful data to predict flow variations by the pressure difference.

1. 서 론

하나로는 열 출력 30 MW의 연구용 원자로로써 1995년 2월 8일 첫 임계에 도달한 후 현재 출력운전 중에 있으며 재료 조사시험, 방사성 동위원소 생산, 중성자 빔 이용연구, 중성자 방사화 분석, 원자로 기술개발 등 다양하게 활용되고 있다. 하나로는 개방형 수조 내부 13 m 깊이에 설치되어 있어 외부로부터 이물질이 떨어지는 경우, 침니를 거쳐 원자로 냉각수 펌프, 관형 열교환기 또는 원자로의 핵연료 냉각수 유동관으

로 들어가서 냉각수 펌프의 임펠러 손상, 관형 열 교환기의 유로차단, 핵연료 냉각수 유동관 유로차단 등 냉각수 상실사고를 유발할 수 있으며 중국에는 원자로를 정지하여야 한다. 이러한 사고 확률은 매우 낮지만 원자로 건조 후 시운전과 출력운전 과정에서 이물질을 제거할 수 있는 스트레이너가 필요하였다. ASME 규격에는 스트레이너의 설계, 제작 및 검사에 대한 요건이 지정되어 있지 않으며 하나로에 적합한 스트레이너가 제작된 사례가 없다. 이를 개발하기 위하여 ASME 자격인증 업체와 계약하여 ASME 요건에 따른 품질, 자재, 시험 및 제작요건에 맞도록 제작하고, 스트레이너의 구조적 건전성 입증, 스크린 설계 등은 한국원자력 연구소가 주관하여 개발하였으며 현장성능시험을

* 한국원자력연구소

** 충남대학교 기계공학과 교수

통하여 그 성능을 입증하였다.

2. 스트레이너 설계

2.1 설계요건

스트레이너는 안전등급 3, 내진등급 1 및 품질등급 Q로 분류된 원자로 냉각계통에 추가로 설치되므로 ASME, SEC. III, Class 3에 의해 설계 및 해석하여 구조적 건전성이 입증되어야 한다. 여과할 이물질의 크기는 유동관의 유로면을 통과할 수 있는 최대크기가 직경 1.2mm이므로 그 이상의 이물질이 투입되지 않도록 스크린의 크기를 결정하여야 한다. 그리고 원자로 냉각계통은 50% 용량의 펌프 두 대가 병렬로 설치되어 있으며 각 펌프의 후단에는 역류를 막기 위하여 체크밸브가 각각 설치되어 있다. 운전 중 한 대의 펌프가 고장나는 경우 역류로 인하여 체크밸브가 닫힘과 동시에 수격현상이 발생하므로 스트레이너의 스크린은 건전성이 유지되어야 한다. 기존 냉각계통에 스트레이너를 추가로 설치하면 차압 손실이 추가되어 펌프 성능이 저하되므로 차압손실을 최소화하기 위하여 스크린의 유효투과면적은 주관의 단면적보다 커야하며 계통유량은 설계유량을 만족하여야 한다.

2.2 스트레이너 설계

개방형 수조 속에 설치된 연구용 원자로의 냉각수의 90%는 노심 하부의 흡입 플레넘 (inlet plenum)으로

공급되어 노심을 지나면서 핵 반응열을 흡수하고, 냉각수의 10%는 노심을 우회하여 수조로 공급된다. 노심 상부에 설치된 침니에는 냉각펌프의 흡입관이 있어 핵 반응열을 흡수한 냉각수와 노심 외부 냉각수를 흡수하여 기체 방사능이 수조 상부로 올라오는 것을 억제한다. 따라서 냉각수의 유동방향을 고려할 때 스트레이너를 펌프 전단에 설치하면 최단시간에 이물질을 제거할 수 있다. 스트레이너의 형식은, 기존의 생산품인 Y형 스트레이너는 설치공간이 부족하고, 바스켓형 스트레이너는 상부에 공기고임이 생기며 설치높이도 부족하므로, 먼간 거리와 설치높이를 조정할 수 있는 T형 스트레이너로 정하였다. 부족한 설치높이를 감안하여 스트레이너를 반시계 방향으로 60도 회전하여 설치하고 끝단에 스크린 청소구를 설치하여 이물질 제거와 스크린 청소를 동시에 할 수 있도록 하여 스크린의 분해조립을 최소화하였다. 제거할 이물질의 크기를 직경 1.2mm 이상을 유지하기 위하여 스크린은 18 메쉬 (투과율: 64.7%)로 정하였으며 펌프고장으로 인한 역류로부터 체크밸브가 닫히는 경우 수격현상으로부터 스크린의 건전성을 유지하기 위하여 스크린 양면에 스크린 지지판을 부착하였다. 이 스크린 지지판은 유동장애가 발생하여 차압손실을 증가시키므로 "W"자 형으로 성형하여 투과면적을 크게 하였다. 그리고, 여과구멍을 60도 지그재그로 배열하였을 때 스크린 지지판의 투과율은 한 변이 피치 P인 평형사변형의 면적에 직경 d인 개구부의 면적 비율이 되므로 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$N_{60} = 0.91 \left(\frac{d}{p} \right)^2 \quad (1)$$

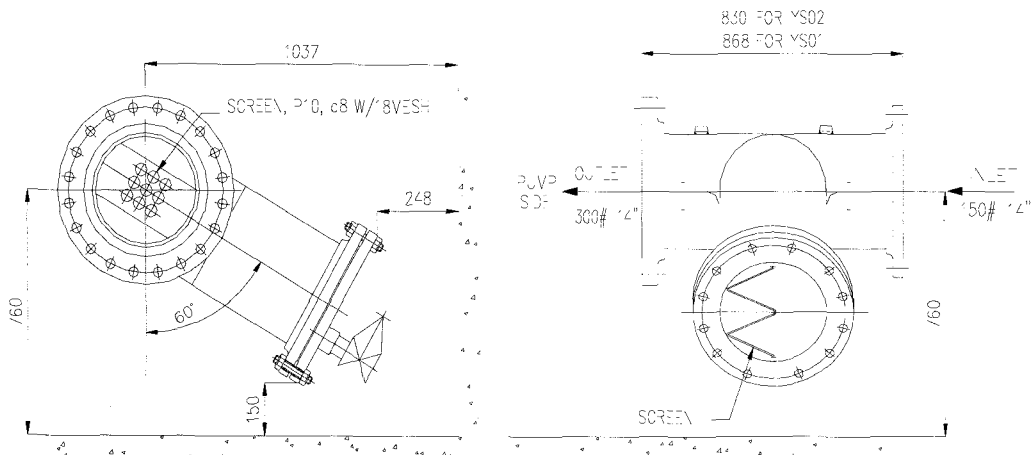


Fig. 1 Outline of ASME T-Type Strainer

직경 8 mm의 여과구멍을 피치 10 mm로 배열하였을 때 스크린 지지판의 투과율은 58.2%이며 직경 1.2 mm 이상의 이물질질을 제거하기 위하여 스크린 지지판 사이에 투과율 64.7%의 18 메쉬 스크린을 끼웠을 때 전체 투과율은 37.6%이다.

스트레이너의 외형도는 Fig. 1과 같으며 스크린 지지판을 타공한 후 "W"자형으로 동일하게 성형된 지지판 사이에 스크린을 끼워 접합점으로 고정하였다.

2.3 유동해석

스크린의 유효투과면적을 계산하기 위하여 T형 스트레이너에 대해 FLOW3D⁽²⁾ 프로그램을 이용하여 3차원 유동해석을 하였다. 스트레이너는 T형 이음 배관이며 직경은 334 mm이고 주관 (run-side pipe) 중심선에서 가지관 (branch-side pipe) 끝까지의 길이는 700 mm이다. 해석구간은 T자 중심에서 입구와 출구의 배관길이를 각각 800 mm와 500 mm로 정하였다. 스크린을 가지관 쪽에서 보면 "W"자 모양이지만 평판으로 간주하고 가지관에서 주관까지 걸쳐지는 가상체적을 설정하여 다공물질 (porous medium)로 처리하였다. 유동해석의 지배 방정식은 식 (2) 및 (3)과 같이 질량보존 법칙과 운동량 보존법칙을 적용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla P + [\nabla \tau] + \rho g \quad (3)$$

난류모델 (turbulence model)은 RNG (re-normalized group) k-ε 모델⁽³⁾을 사용하였으며 계산에 사용된 셀 수는 8690개이다. 경계조건은 x, y, z 방향의 유속을 u, v, w라 하면 입구에서 z 방향의 유속은 일정한 것으로 간주하였다. 출구에서는 모든 변수들이 완전히 발달된 유동 (fully developed flow)의 값을 가진다고 가정하였으며 속도만 제외하고 모두 0의 구배를 가지는 Neumann 경계조건이 적용되었다⁽⁴⁾. 그리고 벽면에서는 미끄럼이 없는 상태로 간주하였다. 정상류로 계산하였을 때에는 수렴하지 않아 우선 계산시간 고정법 (fixed time step)으로 과도상태 (transient) 계산을 수행하고, 이 결과를 다시 초기값으로 사용하여 계산시간 변화법 (adaptive time step option)으로 과도상태를 계산하였으며 그 결과를 정상류 계산으로 간주하

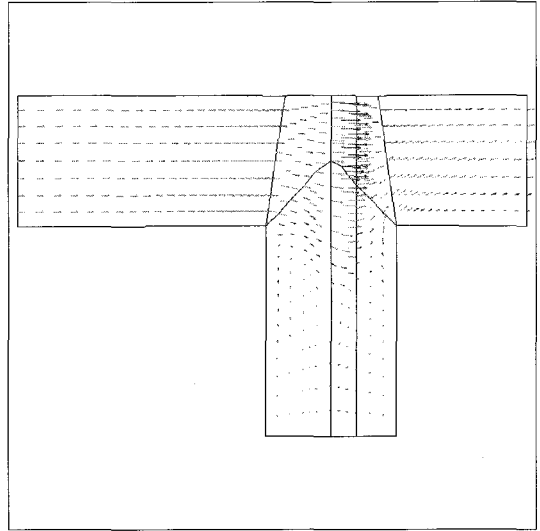


Fig. 2 Flow of T-type Strainer

였다. 스트레이너 하나에 흐르는 질량유량 (이하 유량)이 390 kg/s일 때 3차원 유동해석 결과는 Fig. 2와 같이 T형 관내의 속도를 벡터 분포도로 나타내었다. 유속은 주관에서 13 m/s를 나타내지만 가지관으로 내려올수록 감소하여 관 중심에서 284 mm이하에서는 정체되었다. 따라서, T형관에서 유속이 발생하는 지점까지를 유효 투과면으로 정하였으며 관경의 약 135%에 해당하였다.

유동해석 결과에 따른 스크린 설계의 주요 인자는 Table 1과 같다. 타공판 총면적은 14 인치 관 단면적의 580%, 스크린 유효 타공판 면적은 타공판 총면적의 48%이다. 그리고 스트레이너 타공율, 37.5%를 고려하면 스크린의 유효투과율은 105%를 유지하였다.

Table 1 Screen Design of ASME Strainer

Type	Plate type fabricated with "W"
Screen Holder	Hole/Pitch: 8/10 (mm) Void Rate: 58.2%
Screen	18 Mesh per inch, Void Rate: 64.7%
Void Rate of Screen and Screen Holder	37.6%
Total Perforated Area / Pipe Section Area	580%
Effective Perforated Area / Total Perforated Area	48%
Effective Void Rate	105%

3. 스트레이너의 구조적 건전성 평가

3.1 해석기준

스트레이너의 구조적 건전성을 평가하기 위하여 ASME, SEC. III, DIV. 1, Class 3 요건에 따라 내진해석을 하였다. 스트레이너의 몸체는 배관과 플렌지로 연결되고, 지지관은 덮개 플렌지로 마감되며 조임 볼트로 각각 체결된다. 그러나, 관련 규정에는 스트레이너에 대한 요건이 없어 스트레이너 몸체 및 연결 플렌지에 대하여 각각 유사한 규정인 밸브 (ND-3500) 및 배관 (ND-3600)의 설계 규정을 적용하였으며 지지관 덮개 플렌지에 대해서는 ASME SEC. III DIV. 1의 부록 XI을 적용하여 해석하였다.

3.2 모달해석 (Mode frequency analysis)

스트레이너의 고유진동수를 평가하기 위하여 모달 해석을 하였다. 스트레이너는 유한요소법을 사용하는 ANSYS 프로그램⁽⁵⁾으로 1258 절점의 쉘요소로 모형화하였으며 고유진동수는 71.7 Hz로 계산되었다. 고유진동수가 33 Hz를 상회하고, 구조적으로 강성체 (rigid component)이므로 등가정적해석방법으로 내진해석하였다. 지진하중은 수평방향으로 RIM (Required Input Motion), 4.5 g에 1.5배하여 6.75 g, 수직방향에 대해서는 수평방향에 1 g를 더한 7.75 g로 정하고, 보수적으로 등분포하중을 적용하였다. 스트레이너는 배관에 연결되므로 지진 등의 동적인 사고로 인하여 원자로의 안전정지를 유도하는 사고에서도 구조적 건전성이 확보되어야 하는 운전조건 C⁽⁶⁾에 따라 자중, 설계압

력과 지진하중을 조합한 후 등가정적해석을 수행하여 얻은 조합응력이 Fig. 3에 나타나 있다. 수직응력은 psi 단위로 표시하였다. 최대하중은 주관과 지지관 연결부에서 20.8 ksi (143.4 MPa)이며 허용응력 28.3 ksi (195.1 MPa) 보다 작아 구조적으로 건전함을 입증하였다.

3.3 스트레이너 플렌지의 응력해석

스트레이너 입출구 연결 플렌지의 모우멘트는 등가정적해석으로 구한 값을 적용하였으며 운전조건 A, B 및 C에 대한 판정기준⁽⁷⁾인 식 (4), (5) 및 (6)을 각각 만족하였다.

$$M_{fs} \leq 3125 \left(\frac{S_y}{36} \right) CA_b \quad (4)$$

$$M_{fd} \leq 6250 \left(\frac{S_y}{36} \right) CA_b \quad (5)$$

$$M_{fd} \leq \left[11,250A_b - \left(\frac{\pi}{16} \right) D_f^2 P_{fd} \right] C \left(\frac{S_y}{36} \right) \quad (6)$$

스트레이너의 지지관 덮개 플렌지에 대하여 플렌지의 길이방향, 반경방향 및 접선방향의 응력을 각각 계산하고 플렌지 연결 용접부에 대한 전단응력을 계산하였다⁽⁸⁾. 그 결과, 각 응력은 플렌지 재료의 허용응력 (15.6 kPi, 107.5 MPa)에 대한 설계요건인 식 (7)~(12)를 모두 만족하였다

$$S_H \leq 1.5S_f \quad (7)$$

$$S_R \leq S_f \quad (8)$$

$$S_T \leq S_f \quad (9)$$

$$(S_H + S_R)/2 \leq S_f \quad (10)$$

$$(S_H + S_T)/2 \leq S_f \quad (11)$$

$$\tau_F \leq 0.8S_n \quad (12)$$

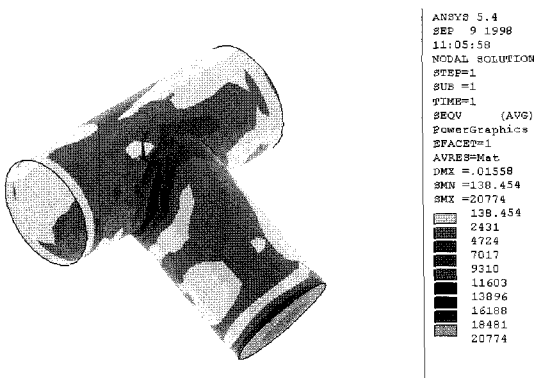


Fig. 3 Normal Stress Contour

4. 성능시험

4.1 시험방법

Fig. 4는 스트레이너 (YS01/YS02) 설치 후 성능시험을 수행하기 위한 시험 장치도이다. 계통의 유동특성을 점검하기 위하여 정상운전과 동일하게 핵연료를 장전하고, 원자로 냉각수 정화계통을 운전하는 상태에서 노심 우회유량조절밸브 (HV037)를 완전히 닫은 다음 원자로 냉각펌프 (P01/P02)를 운전하였다. 유량은 노심 우회유량 조절밸브를 20% 간격으로 열면서 유동이 안정된 뒤 현장에 설치된 노심 유량계 (FE034)와 노심 우회유량계 (FE037)로 측정하였으며 측정오차를 최소화하기 위하여 10초 간격으로 각각 5회씩 측정하여 평균을 구하였다. 그리고, 유량변화를 비교하기 위하여 초음파 유량계를 각 펌프의 흡입관 및 16인치 공통관에 각각 설치하여 유량을 동시에 측정하였다. 한편 압력변화에 대해서는 유량측정과 동일한 방식으로 스트레이너 전 후단 및 펌프 토출압력은 현장압력계 (PIA/PIB/PI2A /PI2B/PI021/PI031)로 각각 측정하였다. 압력변화를 비교하기 위하여 펌프토출관의 공통배관에 설치된 원자로 정지계통의 압력전송장치 (PT09)로 동시에 측정하였다.

4.2 결과 및 고찰

4.2.1 계통의 유량변화

T형 스트레이너 설치 후 원자로 냉각수의 유량을 측정된 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 스트레이너 설치 전 총 유량은 노심 우회유량 조절밸브를 50% 열었을 때 788kg/s를 기록하여 설계유량을 만족하였으나 스트레이너 설치 후 추가압력 손실로 인하여 총 유량이 약 10kg/s 감소하여 노심 우회유량 조절밸브를 48% 열었을 때 설계유량 780kg/s를 만족하였다. 노심 우회

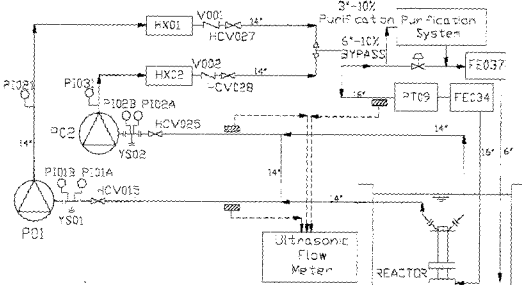


Fig. 4 Schematic Diagram of Strainer Performance Test

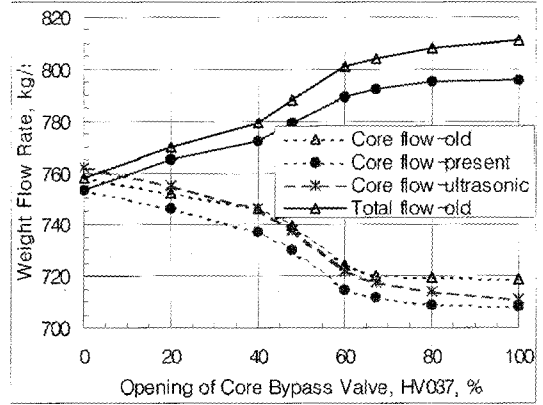


Fig. 5 Flow Variation of Reactor Coolant

유량 조절밸브를 64% 열었을 때 총유량은 791kg/s이고 노심유량은 713kg/s를 지시하여 우회유량은 설계유량 (77kg/s)을 만족하였다. 노심 우회유량 조절밸브를 완전히 열어도 노심 설계유량 (703kg/s)을 상회하므로 스트레이너를 추가 설치하여도 항상 노심 유량이 유지됨을 알 수 있다. 그리고, 노심 유량을 초음파 유량계로 측정하였을 때에는 현장에 설치된 유량계로 측정된 값보다 약 1% 높게 지시하였으며 설계유량을 만족하였다.

4.2.2. 스트레이너 설치 후 계통의 압력변화

유량변화에 따른 계통의 압력변화를 그림 6에 도시하였다. 펌프 두 대가 동시에 가동하는 경우 펌프 한 대의 설계유량은 390kg/s이며 스트레이너에 의하여 25kPag의 압력손실이 추가로 발생하였다. 이 때 펌프의 토출압력은 485kPag (49mAq)를 나타내었으며 수 두로 환산하면 정격양정 47mAq보다 2mAq 상승하였

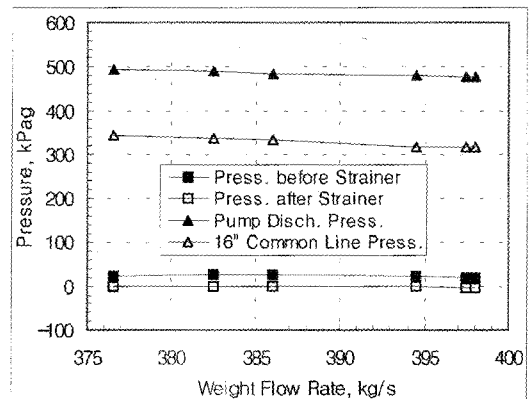


Fig. 6 Pressure Variation

다. 이러한 변화는 유량변화에서 언급한 약 10 kg/s의 유량감소로 나타난 원인이다. 16 인치 공통관에서 측정된 압력은 펌프 토출압력과 동일한 경향을 나타내었으며 관로손실에 의해서 약 150 kPag 낮게 나타났다.

4.3 스트레이너의 유동특성

Fig. 7에 스트레이너의 유동특성을 확인하기 위하여 무차원 상수인 압력손실계수 (k)로 표시하였다. 압력손실계수는 베르누이 방정식으로부터 유도된 Darcy-Weisbach의 관계식 또는 관 마찰손실 계산식⁽⁹⁾으로부터 식 (13)과 같이 유속과 차압의 함수로 표시하였다.

$$k = \frac{dP}{\left(\frac{v^2}{2g}\right)} \quad (13)$$

스트레이너, YS-01과 YS-02의 차압은 각각 3.22 mAq와 3.35 mAq를 지시하여 2번 스트레이너가 조금 높은 차압을 나타내며 압력손실계수를 계산하였을 때에도 2번 스트레이너가 조금 높게 나타났다. 이것은 스트레이너 설치 전에도 1번 펌프의 유량이 2번 펌프 보다 5kg/s 더 많이 발생하므로 유속이 커지면 압력손실계수는 작아진다. 그러나 이러한 차이는 펌프양정에 비교해 아주 작은 값이므로 계통에 영향을 미치지 않는다.

5. 결 론

원자로 냉각수에 투입된 이물질 제거하기 위하여 두 개의 원자로 냉각수펌프 전단에 T형 ASME 스트레이너를 각각 설치하여 현장 성능시험을 통하여 얻은

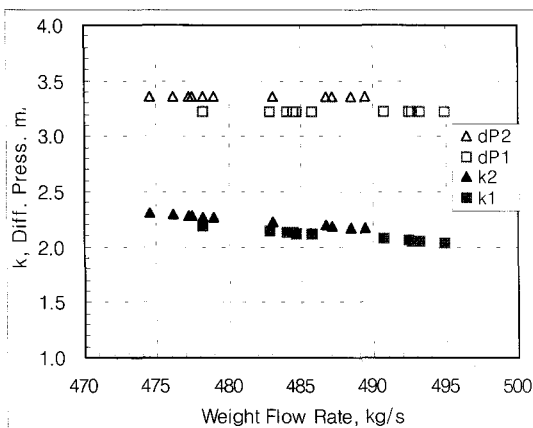


Fig. 7 Pressure Loss Coefficient

결론은 다음과 같다.

- 1) 스트레이너는 ASME SEC. III, DIV. 1, Class 3 설계요건에 따라 내진해석을 수행방법을 정립하였으며 허용기준을 만족하여 구조적으로 건전함을 입증하였다.
- 2) T형관의 유동해석을 통하여 스트레이너의 유속 분포도를 구하였으며 이를 이용하여 스크린의 유효투과면적은 관경의 1.35배로 정하였다.
- 3) 스트레이너를 추가 설치하여도 원자로 냉각유량은 설계유량을 만족하며 노심 우회유량 조절밸브를 60% 이상 열었을 때 약 10kg/s만큼 여유가 있으므로 우회유량 조절밸브의 열림 정도에 따라 여유 있게 원자로를 냉각시킬 수 있다.
- 4) 스트레이너의 압력손실계수를 구하였으며 유량변화에 따른 압력손실을 계산할 수 있으므로 원자로 냉각수 유동해석 및 원자로 운전 등에 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 원자력 연구개발 계획의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 유 성연, 1998, "하나로 (HANARO)," 대한기계학회, 기계저널, Vol. 38, No. 11, P64-65.
- (2) FLOW3D 3.2, User's Manual, AEA Industrial Technology, 1992.
- (3) Fluent Inc., 1993, Introduction to the Re-normalized Group Method and Turbulence Modeling, Technical Memorandum, TM-107,
- (4) Carnahan, B., Luther, H. A., Wilkes, J. O., "Applied Numerical Methods", John Wiley & Sons. Inc., pp. 462~464.
- (5) ANSYS 5.4, 1998, User's Manual, ANSYS Inc.
- (6) 한국원자력연구소, 1996, "하나로 안전성분석보고서," KAERI/TR-710/96, vol. 1, pp. 3~45.
- (7) ASME Section III, Subsection ND, Class 3 Components, 1989, pp. 153~154.
- (8) ASME Section III, Div. 1, Appendices XI, 1989, pp. 393~394.
- (9) 박 용철, 조 성안, 1998, 유체기계기술사, 청운문화사, pp. 127.