

‘95 춘계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

고온 열천이하중을 받는 액체금속로 Y-구조물에 대한 크립효과

김종범, 이형연, 유봉

한국원자력연구소

곽대영, 임용택

한국과학기술원

요 약

액체금속로는 기존의 가압경수로와는 달리 550°C 정도의 고온에서 운전이 되므로 고온 열응력이 중요한 문제로 대두되며 따라서 고온에서의 크립(Creep) 변형, 반복되는 기동과 정지 등으로 인한 되풀이 소성변형, 라체팅(Ratchetting), 크립과 소성의 상호작용 및 크립과 피로의 상호작용 등의 평가에 대한 기술 확립과 고온구조물에 대한 우리의 독자적인 설계방법을 개발하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 범용 유한요소해석코드인 ABAQUS의 축대칭 요소를 이용해서 액체금속로 원자로용기와 이에 부착된 열소매(Thermal sleeve)를 Y-형태의 구조물로 모델링하여 반복되는 열천이하중에 대한 비탄성 구조해석을 수행하고 크립효과에 대한 영향을 분석하였다. 해석 결과 액체금속로와 같은 고온구조물에 대하여 반복 열천이 하중과 고온 지속시간이 유발하는 크립효과가 크게 나타남을 알 수 있었다.

1. 서 론

액체금속로[1]와 같은 고온구조물의 열응력을 해석하기 위해서는 우선 정확한 온도분포 해석이 선행되어야 하는데 온도에 따른 재료의 비선형 특성과 실제 구조물의 기하학적 복잡성으로 ABAQUS[2]와 같은 유한요소해석 코드를 이용하는 것이 편리하다. 열응력은 구조물 내에 비균질한 온도분포를 갖거나 또는 변형을 제한하는 외부조건에 의해서 발생하는데 엄밀하게는 변형과 온도분포가 상호 의존하지만 급속한 금속가공 등 열탄성 소모가 관심의 대상인 일부 경우를 제외하고는 온도분포해석과 열응력해석을 분리해서 수행하여도 공학적 견지에서 큰 오차가 없는 것으로 알려져 있다[3]. ABAQUS에서는 열평형식을 변분 또는 미분형태로 표현하여 해를 구하며 재료의 영률, 포와송비, 항복응력 등의 온도의존 값들을 수집 가능한 몇가지 온도에서의 값들로 입력

하면 그 사이값들은 선형내삽법으로 구하여 적용하게 된다.

크립은 일정한 하중하에서 재료의 변형이 시간에 따라 증가하는 재료의 시간의존 비탄성거동을 말하며 고온구조물의 경우 $0.3T_m$ (여기서 T_m 은 재료의 용융온도) 이상에서 중요한 변형기구로 등장하며 응력이완(Stress relaxation)은 본질적으로 크립과 같은 성질로서 일정한 변형하중하에서 응력이 시간에 따라 감소하는 현상을 나타낸다. 크립은 일반적으로 1차, 2차 및 3차크립으로 구분되는데 1차크립은 크립 변형률속도가 시간에 따라 감소하고 2차크립은 일정 크기의 최소 크립 변형률속도를 상당 기간동안 유지하는 구간으로 이를 정상상태 크립이라고도 부른다. 3차크립은 변형률속도가 증가하는 구간으로 재료의 파단으로 바로 이어지는 영역이므로 대부분의 크립해석은 1차크립과 2차크립 해석에 집중되고 있다. 본 연구에서는 비탄성해석에 2차크립을 포함하였으며 크립구성방정식은 다음과 같은 널리 알려진 Norton 식[4]과 시간경화법칙을 사용하였다.

$$\frac{d\epsilon_{cr}}{dt} = A\sigma^n$$

여기서 ϵ_{cr} 은 크립 변형률이며 A와 n은 재료상수이다.

비탄성변형률은 일반적으로 앞에서 언급한 크립변형률과 시간에 무관한 소성변형률로 구성되어 있는데 이의 해석을 위하여 많은 연구가 진행되었고 또한 현재에도 계속되고 있다. 대표적인 경우로는 미국 ORNL에서 고온 구조용 강에 적용할 수 있는 분리형인 ORNL 방법[5]을 제안하였고, 프랑스의 Chaboche[6]는 소성변형과 크립변형이 비선형적으로 연계되어 있는 통합 점소성 모델을 제안하였으며, 일본의 Wada 등[7]은 ORNL 방법을 조금 개량한 2 직선 근사법을 개발하였다. 이밖에도 미국, 영국, 프랑스, 일본을 비롯한 각국에서 여러가지 고온재료에 대한 새로운 구성방정식을 개발하고 계산코드를 개발하는데 많은 노력을 기울이고 있다.

본 연구에서는 액체금속로의 원자로용기와 이에 부착된 열소매(Thermal sleeve)를 범용 유한요소해석코드인 ABAQUS의 축대칭 요소를 이용해서 Y-형태의 구조물로 모델링하였고, 발전소의 기동과 정지조건을 모사한 주기적으로 반복되는 열천이하중에 대한 Y-구조물의 비탄성 구조해석을 수행하여 열천이하중의 영향과 크립효과를 분석하였다. 해석에 사용된 소성변형률 경화로는 이직선 등방 경화(Bilinear isotropic hardening)를 사용하였고 크립변형에 대하여는 2차크립만을 포함하였다.

2. 본 론

2.1 Y-구조물의 모델링 및 해석조건

액체금속로의 원자로용기 또는 고온의 액체금속인 나트륨(Na)을 통과시키는 노즐 등에는 구

조물이 고온의 액체금속과 직접적인 접촉을 피할 수 있게 열소매 구조를 채택하는 것이 보편화되어 있으며 본 논문에서는 이상화된 Y-구조물을 선택하여 축대칭 8 절점요소인 CAX8RT 요소를 사용하여 그림 1에 보인 것과 같이 모델링하였다. 해석에 사용된 경계조건 및 치수 등은 그림 1에 표시되었으며 Y-구조물에는 512 개의 요소와 1707 개의 절점이 사용되었으며 Y-구조물 접합부 사이의 Ar 가스가 채워진 부분은 136 개의 요소와 350 개의 절점이 사용되었다. 구조물의 왼쪽 경계선을 따라 열천이 하중이 가해지고 오른쪽 경계선에는 단열조건을 사용하였다. Y-구조물의 사용재료인 304 SS의 245°C부터 579°C 사이의 영률, 영팽창계수, 항복응력[8]은 표 1에 나타나 있다. 또한 304 SS의 열전도계수는 16.2W/m°C, 비열은 500J/Kg°C, 밀도는 7.9×10^3 Kg/m³, 포와송비는 0.34 이다[9]. 재료의 이직선 등방 경화를 가정하였으며 소성경화 기울기는 103GPa을 사용하였다. 그리고 Y-구조물의 접합부에 채워진 아르곤가스(Ar)의 밀도는 1.78×10^{-9} Kg/mm³, 비열은 522.6 J/Kg°C, 열전달계수는 열복사를 고려한 등가열전도계수값인 2.29 J/hr-mm°C를 사용하였다.

주기적으로 변하는 열천이하중은 변형률제어 조건과 유사한 양상을 갖는 것으로 알려져 있으며[10] 실제의 운전조건과 비슷한 변형률제어 운전조건을 개발하려는 노력도 있다[11]. 여기에서는 Y-구조물의 내벽이 그림 2에 보인 것과 같이 실제의 기동운전, 정격운전 및 정지운전시 온도조건을 모사한 열천이하중을 2 사이클 받을 때 열응력 및 크립변형의 영향을 분석하고자 하였다. 특히 크립변형의 영향을 파악하기 위하여 두 경우의 해석을 수행하였는데 첫번째는 이차크립 영향을 포함하지 않았고 두번째는 변동하는 온도 상황이지만 운전온도중 최대값에 가까운 540°C에서의 이차크립 계수 A와 n의 값이 각각 $1.0 \times 10^{-18} (\text{N/mm}^2)^{-6} \text{ hr}^{-1}$ 과 6을 보수적으로 사용하였다 [12].

2.2 해석결과

그림 2와 같은 반복 열천이하중을 받는 Y-구조물에 대한 온도분포 해석결과는 그림 3과 같다. 이는 기동후 열천이하중이 최고치인 550°C에 도달하는 20 시간후에서의 구조물의 온도분포 해석결과를 나타낸 것이다. 이때의 온도분포 해석결과로부터 구한 Tresca 응력강도 분포를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에 보인 것과 같이 최대응력이 발생하는 부위는 Y-구조물의 접합부 부분이며 최대 응력강도를 나타내는 Y-구조물 접합부의 333번 요소에 대하여 응력 및 변형률 해석으로부터 크립효과의 영향을 살펴보면 그림 5 및 그림 6과 같다.

그림 5는 시간에 따른 각 응력 성분들의 이력치를 나타내는데, 기동시에 발생한 열응력이 재료의 항복강도를 넘어서 소성영역에 이르렀다가 잔류응력의 형태로 돌아오고, 열천이하중이 550°C로 유지되는 지속시간 동안에 응력이완(S11의 경우 응력이 86.41 MPa에서 83.16 Mpa로 감

소) 현상이 발생함을 알 수 있다. 그림 6은 시간에 따른 각 변형률 성분들의 이력치를 보여주는 데 이 때에는 열처리가 하중이 550°C로 유지되는 지속시간 동안에 크립변형이 증가함(ϵ_{11} 의 경우 5.1031×10^{-3} 에서 5.2856×10^{-3} 으로 증가)을 알 수 있다. 이러한 응력이완과 크립은 크립효과를 포함하지 않은 비탄성해석에서는 보이지 않는 현상이며, 실제로 그림 5와 그림 6은 열팽창과 온도구배에 의한 것을 모두 포함한 총응력과 총변형률을 나타낸 것으로 압축응력일 때에도 변형률은 양의 값을 가질 수 있는 열응력 특유의 특성을 보여주고 있다.

크립을 포함하지 않은 해석과 크립을 포함한 해석에 대하여 온도분포 해석결과는 같으므로 열팽창에 의한 변형량도 서로 같다. 따라서 본 논문에서는 크립의 영향을 비교 분석하기 위하여 두 경우에 대해서 각각 전체변형률에서 단순 열팽창에 의한 변형을 뺀 변형률에 대한 응력 곡선을 각각 그림 7과 그림 8에 나타내어 비교하였다. 그 결과 열처리가 하중을 받는 구조물의 물성치가 온도에 따라 변하는 경우의 복잡한 거동 양상을 볼 수 있고 또한 크립이 포함된 경우에는 크립변형과 응력이완의 현상이 복합적으로 나타나고 있음을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 250°C부터 550°C 온도구간에서 기동과 정격운전(지속시간) 및 정지되는 반복적인 열처리가 하중을 받는 Y-구조물에 대한 비탄성 구조해석을 수행하고 크립효과에 대한 영향을 분석하였다. 해석 결과 액체금속로와 같은 고온구조물에 대하여 반복 열처리가 하중과 고온 지속시간이 유발하는 크립효과가 크게 나타났다. 본 논문에서는 정상상태인 2차크립만을 고려하였으나 이는 앞으로 열처리가 하중에 따른 1차크립의 효과와 변하는 온도에 따르는 크립 물성치를 고려한 해석이 요구된다.

참고문헌

1. 액체금속로 요소기술 개발, KAERI/RR-1396/93
2. ABAQUS, Version 5.4, HKS, USA
3. B.A.Boley and J.H.Weiner, Theory of Thermal Stresses, John Wiley and Sons, Inc., 1960
4. R.W.Evans and B.Wilshire, Creep of Metals and Alloys, Dotesios Printers Ltd., 1985
5. J.M.Corum et al., "Interim Guidelines for Detailed Inelastic Analysis of High Temperature Reactor System Components", ORNL-5014, 1974
6. J.L.Chaboche and D.Nouailhas, "The Unified Constitutive Equation Model for Cyclic Visco-Plasticity and Its Applications to Various Stainless Steels", Trans. ASME, 111, 424-430 (1989)

7. Y.Wada et al., “ Analytical Representation for the Cyclic Stress Strain Hysterisis Loops”, Proc. of Int. Conf. on Comp. Mech. Vol. 1, Springer-Verlag, 1986
8. ASME B&PV Code, Code Case N-47, ASME, New York, 1992
9. Metal Handbook, 9th Ed., Vol. 3: Properties and Selection
10. S.S.Manson, Thermal Stress and Low Cycle Fatigue, McGraw Hill, New York, 1966
11. K.H.Kloos et al., “Simulation of the Service Conditions of Heat Resistant Steels by Creep Rupture Tests under Variable Stress or Temperature and by Strain Controlled Service Type Fatigue Tests”, 5th Int. Conf. on Fracture, 1981
12. K.B.Yoon, “Time Dependent Fracture”, 1992 KSME Technical Lecture

표 1. 304SS 의 기계적 물성치[8]

온 도 (°C)	Yield Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Mean Thermal Expansion Coefficient($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)
245	133	184	16.9
301	125	175	17.2
356	122	171	17.4
384	119	168	17.6
412	116	166	17.7
440	114	164	17.8
468	112	162	17.9
495	110	160	18.0
524	108	157	18.1
551	105	155	18.2
579	101	152	18.3

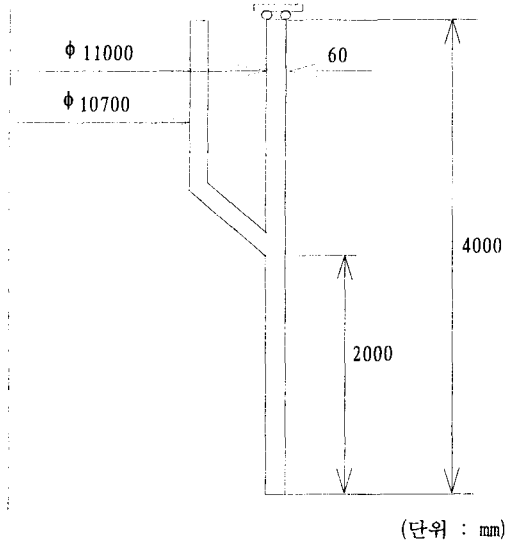


그림 1. Y-구조물 해석 모델 개략도

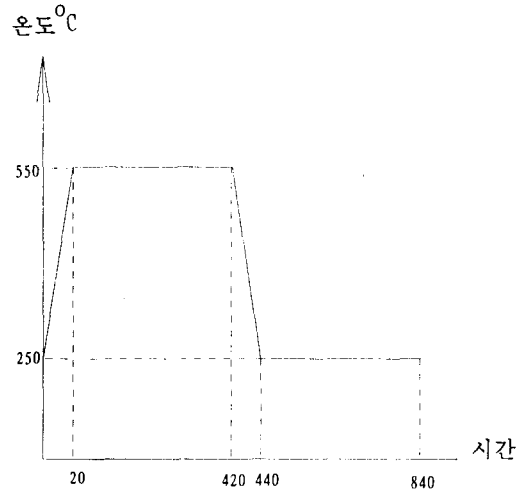


그림 2. 열전이 하중선도 (1 사이클)

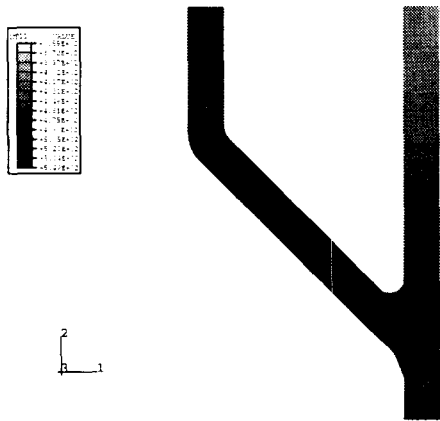


그림 3. 기동후 온도분포 (20 hr)

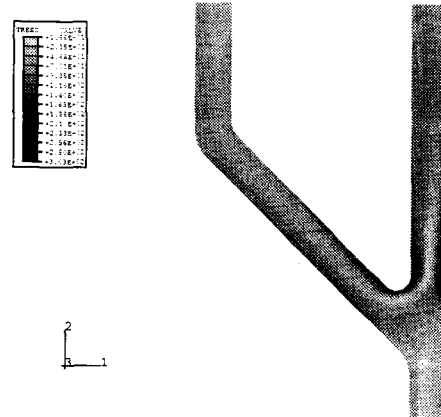


그림 4. 기동후 구조물의 Tresca 응력강도분포 (20 hr)

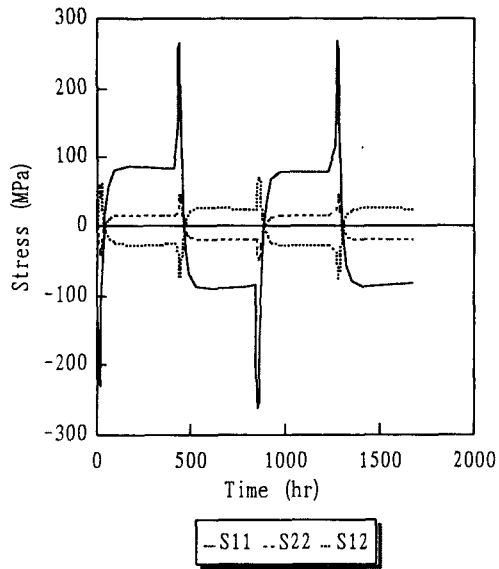


그림 5. 시간에 따른 응력선도
(Y-접합부 333번 요소)

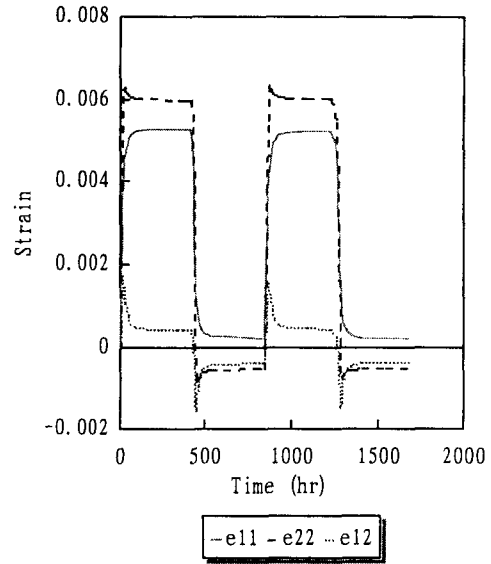


그림 6. 시간에 따른 변형률선도
(Y-접합부 333번 요소)

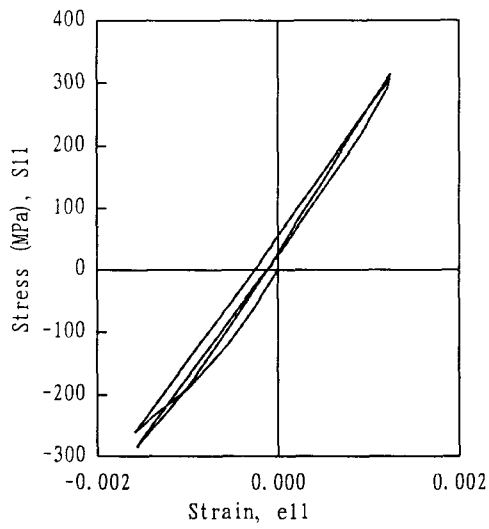


그림 7. 응력-변형률 선도
(크립없는 경우)

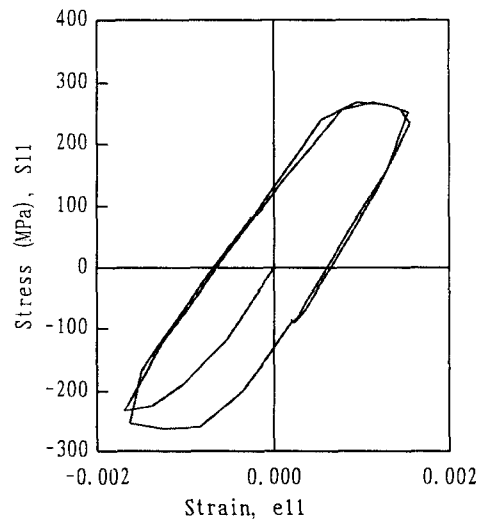


그림 8. 응력-변형률 선도
(크립있는 경우)