

# NONSTA-VP코드 비탄성 재료상수의 변화에 따른 고온구조거동 비교

전계포, 김종범, 박창규, 이재한  
 한국원자력연구소 대전광역시 유성구 덕진동 150  
 pobest@kaeri.re.kr

## 1. 서론

저자는 비탄성 구조해석을 수행하기 위해 개발한 NONSTA-EP 코드와 고온 크립변형까지 모사할 수 있는 NONSTA-VP 코드의 비탄성 재료상수의 영향을 분석한 바 있다[1-2].

이들은 라체팅현상과 크립-피로와 같은 고도의 비선형 해석이 요구되는 문제에 적용할 수 있는데 구성식이 복잡하고 여러 가지 재료상수들을 포함하고 있다. 이들 재료상수값들은 여러 가지 온도에서 다양한 변형을 조건을 부여한 저주기 피로실험 및 크립실험 결과로부터 구해지는데 나라마다 같은 재료이더라도 재료실험 결과가 차이가 나고 또한 재료상수를 구하는 방법이 다르기 때문에 표준화된 상수값이 제공되지 않는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실험데이터로부터 재료상수 값을 결정하고 실험데이터의 분산이 상수값에 미치는 영향과 이에 따른 고온구조거동을 분석하여 향후 해석 결과의 신뢰성을 높일 수 있도록 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 NONSTA-VP 및 ABAQUS의 비탄성 점소성 해석모델

통합형 점소성 구성식 중에 세계적으로 가장 널리 알려진 Chaboche 모델[3]을 장착하여 개발한 NONSTA-VP 코드의 주요 구성식은 다음과 같다.

먼저 소성 변형률은 유동 법칙에 의해 식(1)과 같이 정의된다.

$$\dot{\epsilon}_p = \dot{\rho} n, \quad n = \frac{3}{2} \frac{s - X}{J(s - X)}$$

$$\dot{\rho} = \left\langle \frac{J(s - X) - (\kappa + \sigma_y)}{K} \right\rangle^n \quad (1)$$

여기서 s는 편차 응력 성분을 나타내며,  $\dot{\rho}$ 는 등가소성변형률을 나타내고 n은 소성변형률의 방향을 나타낸다. 그리고 식(2)의  $J(s - X)$ 는 초과응력(s - X)에 대한 Mises유효 응력을 나타낸다.

$$J(s - X) = \sqrt{\frac{3}{2} (s_{ij} - X_{ij})(s_{ij} - X_{ij})} \quad (2)$$

이동 경화 응력의 발전식은 식(3)으로 정의된다.

$$\dot{X} = \frac{2}{3} C \dot{\epsilon}_p - \gamma \dot{X} \dot{\rho} = \left( \frac{2}{3} C n - \gamma \dot{X} \right) \dot{\rho} \quad (3)$$

등방 경화 응력의 발전식은 식(4)로 정의된다.

$$\dot{\kappa} = b(Q - \kappa) \dot{\rho} \quad (4)$$

### 2.2 하중의 속도가 다른 비대칭 하중

반복하중을 적용할 때 하중의 속도에 대한 특성을 살펴보았다. 일반적으로 고온 구조용강은 변형률제어 피로시험에서 Fast tension - Slow compression 비대칭하중을 가하면 속도가 균일한 대칭하중의 경우와 피로수명이 큰 차이를 보이지 않는데 Slow tension - Fast compression의 비대칭하중을 가하면 피로수명이 단축되는 것으로 알려졌다[4]. 이러한 속도의존 하중에 대한 소성 응답을 적절히 모사하기 위해서는 별도의 소성 모델을 사용해야 하는데 본 연구에서는 NONSTA 코드를 수정하지 않고 속도의존 하중에 대하여 어떻게 거동하는지 550°C의 일정 고온 상태에서 재료상수값의 변화를 주면서 분석하였다. 인장-압축 속도가 각각 1mm/s로 일정한 경우를 기준으로 비교하였고 결합탄소성 재료상수값은 20%씩 증감하여 그 영향을 살펴보았다. 결합경화모델을 사용한 경우에는 상수값을 ± 20% 변화했을 때 그림 1과 같이 응력범위의 값이 ± 6% 변하였는데 Slow-Fast 하중과 Fast-Slow 하중에 대해서는 차이가 없었다. 즉 결합탄소성 모델이 속도의존 소성해석 기능을 가지려면 보완이 필요함을 알 수 있다.

NONSTA-VP 코드는 점소성 구성식을 장착하였는데 이동경화와 등방경화 성격은 결합탄소성 모델과 유사하나 추가적으로 소성 변형률 속도항을 포함하고 있으므로 크립 재료상수 K, n은 고정하고 C, γ, Q, b만 결합경화모델의 경우와 마찬가지로 변화시켜보았다. 재료상수의 값이 ± 20%에 변화함에 따라 응력범위 값은 ± 8% 정도 변화하여 결합탄소성 경우보다 조금 증가하였고 그림 2와 같이 Slow-Fast 하중의 경우 인장 항복이 일찍 발생하고 Fast-Slow 하중의 경우 압축 항복이 일찍 발생하여 이력곡선의 경향은 차이가 있지만 하중의 속도가 달라도 총 응력범위는 동일하게 나타나 속도 의존 거동은 충분히 구현하지 못했다.

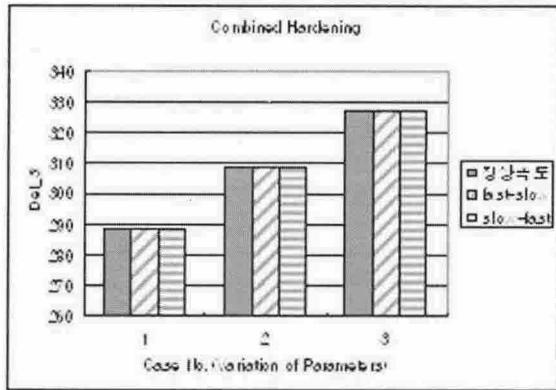


그림 1. 하중속도와 재료상수값에 따른 탄성범위 변화

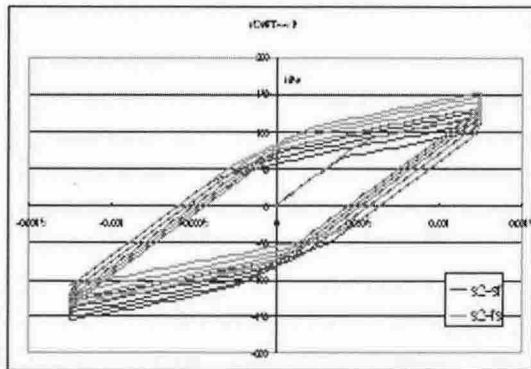


그림 2. 하중속도에 따른 VP 해석결과 비교

### 2.3 NONSTA-VP의 크립 재료상수 영향분석

NONSTA-VP의 크립 재료상수인  $K, n$  값이 해석결과에 미치는 영향을 분석하였다.

NONSTA-VP의 재료상수 중에서 소성 경화를 모사하는  $C, \gamma, Q, b$ 의 값은 각각 40600MPa, 139.4, 95.6MPa, 50.4이고 초기 탄성변형의 값은 6MPa를 사용하였다. 크립변형을 모사하는  $K, n$ 의 값은 150MPa, 12를 기본값으로 하고 이들을 각각 20%씩 증감시키면서 그 영향을 분석하였다.

SS316L이 550°C의 고온 환경에서 277시간의 고온 유지시간을 갖는 반복 변위하중을 5사이클 적용한 비탄성 해석에  $K$ 와  $n$  값을 변화하였을 때의 응력-변형률 선도는 그림 3과 같다.  $K$  또는  $n$  값이 증가할수록 경화가 증가하고 유지시간 동안 응력완화크기도 증가한다.  $K, n$  값이 50% 증가하면 응력완화는 30% 증가하고 응력범위는 46% 증가하였는데,  $K$  값은 일정하고  $n$  값만 증가시킨 경우에는 소성기울기와 경화는 증가하지만 유지시간동안 응력완화의 크기에는 큰 영향을 주지

않았다. 이는 응력의 수준과  $K$  값의 비에 따라서 크립 거동이 영향을 받기 때문이다. 즉,  $K$  값은 점소성 변형률의 기울기가 급격히 변하는 응력의 크기를 나타내고  $n$ 은 그 때의 기울기의 변화에 영향을 주는 인자임을 확인하였는데 다양한 환경에 따른 추가적인 분석을 통해 최종적인 결론을 내릴 수 있을 것이다.

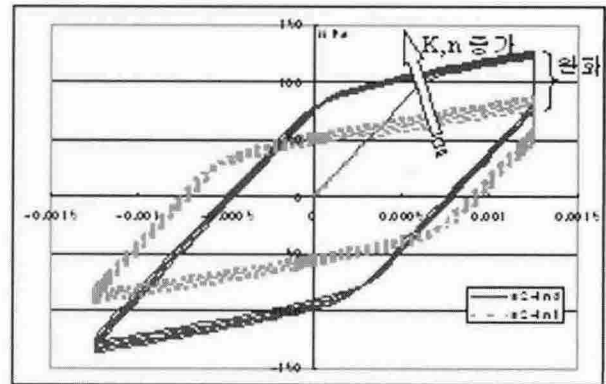


그림 3.  $K, n$  값에 따른 응력-변형률선도

### 3. 결론

본 연구에서는 NONSTA-VP코드의 하중속도에 대한 특성을 살펴보고 크립 재료상수의 변화에 따른 해석결과에 영향을 분석하였다. NONSTA-VP코드는 속도 의존 거동을 충분히 구현하지는 못했지만 크립 재료상수  $K, n$ 의 영향을 제한적으로 분석하였다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 지원을 받아 2004년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었음.

### 참고문헌

- [1] 김종범, ABAQUS용 크립피로 평가코드 NONSTA-VP 사용자지침서, LMR/MS486-CM-01, 한국원자력연구소, 2001
- [2] 전계포 외, "고온 비탄성해석코드의 재료상수 결정 및 영향분석," 한국원자력학회 춘계 학술발표회, 2004
- [3] Chaboche, J. L., "Cyclic Viscoplastic Constitutive Equations, Part I : A Thermodynamically Consistent Formulation," J. Appl. Mech., Vol. 60, pp. 813, 1993
- [4] Asada, Y., et. al., "Creep Fatigue Environment Interaction in Modified 9Cr-1Mo Steel," PVP-Vol.230, p.47, ASME 1992