

< 연구논문 >

# 지진하중 조건의 비선형 유한요소해석에서 반복경화 거동 고려를 위한 Bi-linear 응력-변형률 곡선

정현준\*·김진원\*\*·김종성\*\*·구경희\*\*\*

## Bi-linear Stress-Strain Curves for Considering Cyclic Hardening Behavior of Materials in the Nonlinear FE Analysis under Seismic Loading Conditions

Hyun Joon Jeong\*, Jin Weon Kim\*\*, Jong Sung Kim\*\* and Gyeong Hoi Koo\*\*\*

(Received 9 November 2018, Revised 3 December 2018, Accepted 4 December 2018)

### ABSTRACT

This study compares true stress-true strain curves obtained by tensile tests of various piping materials with bi-linear stress-strain approximation suggested in the JSME Code Case(CC) Draft, a guideline for piping seismic inelastic response analysis. Based on the comparisons, the reliability of the bi-linear approximation is evaluated. It is found that bi-linear stress-strain curve of TP316 stainless steel is in good agreement with its true stress-true strain curve. However, Bi-linear stress-strain curves of TP304 stainless steel and carbon steels determined by the approximation cannot appropriately estimate their stress-strain behavior. Accordingly new bi-linear approximations for carbon steels and low-alloy steels are proposed. The proposed bi-linear approximations for carbon and low-alloy steels, which include the temperature effect on strength and hardening of material, estimate their stress-strain behavior reasonably well.

**Key Words :** Bi-linear Stress-Strain Curve (이중 선형 응력-변형률 곡선), Beyond Design Basis Earthquake (설계기준초과지진), Cyclic Hardening Behavior (반복경화거동), Structural Materials (구조재료)

## 1. 서 론

원전의 기기 및 설비는 지진하중에 대해 충분한 안전여유도를 갖도록 설계·제작된다. 그러나, 2000년대 이후 후쿠시마 원전을 비롯한 몇몇 원전이 설계기준을 초과하는 지진을 경험함에 따라 안전 관련 핵심 기기와 설비에 대해서는 설계기준지진뿐 아니라 설계기준을 초과하는 지진 조건에서 충분한 건전성 확보와 이를 확인하기 위한 평가를 요구하고 있다.<sup>(1-3)</sup>

기존의 설계기준지진 조건에서는 원전 기기와 설비가 탄성거동을 갖도록 설계되며, 선형 탄성해석과 응력기반의 허용기준을 적용하여 구조건전성을 평가한다.<sup>(4)</sup> 그러나, 설계기준초과지진 조건에서는 큰 진폭의 반복하중이 작용되므로 구조건전성 평가시 기기와 설비의 비선형 거동이 고려되어야 한다.<sup>(5-8)</sup> 즉, 재료의 반복 변형거동이 반영된 동적 탄소성 해석이 수행되어야 하며, 반복 변형거동을 고려하기 위한 적절한 경화 모델의 적용은 해석 결과의 신뢰성에 크게 영향을 미친다.

일반적으로 탄소성 유한요소해석에서 재료의 반복 변형 거동을 고려하기 위한 경화 모델로는 등방경화, 이동경화, 그리고 복합경화 모델이 적용된다.<sup>(9)</sup> 기존 연구에 의하면 이들 모델 중 Chaboche 모델<sup>(10)</sup>

† 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과

E-mail : jwkim@chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7109 FAX : (062)232-9218

\* 조선대학교 원자력공학과

\*\* 세종대학교 원자력공학과

\*\*\* 한국원자력연구원

에 기초한 복합경화 모델이 재료의 반복 응력-변형률 시험 결과를 가장 잘 예측하며, 지진하중 조건의 배관 거동에 대해서는 이동경화 모델과 복합경화 모델이 거의 유사한 예측 결과를 보이는 것으로 알려져 있다. 그러나, Chaboche 모델에 기초한 경화 모델을 적용하는 경우에는 재료 상수 결정에 따른 오차가 큰 것으로 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 따라서, 배관의 비선형 지진응답해석을 위해 개발 중인 일본의 JSME Code Case (CC) 초안<sup>(11)</sup>에서는 배관 계통에 대한 비선형 지진해석시 반복경화 모델로 Bi-linear 응력-변형률 곡선에 기초한 이동경화 모델의 적용을 권장하고 있다. 또한, 원전 배관에 사용되는 탄소강 (CS, Carbon Steel) 과 TP316 및 TP304 스테인리스강 (SS, Stainless Steel) 에 대해서는 설계코드<sup>(12)</sup>의 재료 물성에 기초한 Bi-linear 응력-변형률 곡선 결정식을 제시하고 있다. JSME CC 초안에 제시된 Bi-linear 응력-변형률 곡선 기반의 이동경화 모델은 다른 반복경화 모델에 비해 단순하며 강건하고, 실험 데이터가 없을지라도 설계 코드의 재료 물성을 활용할 수 있는 적용성 측면에서 큰 장점을 갖는다.

따라서, 본 논문에서는 JSME CC 초안에 제시된 각 재료의 Bi-linear 응력-변형률 곡선식을 국내 원전에 사용되고 있는 탄소강, 저합금강 (LAS, Low-alloy Steel), 그리고 오스테나이트계 스테인리스강 배관재의 인장시험 데이터와 비교함으로써, JSME CC 초안에 제시된 각 재료의 Bi-linear 응력-변형률 곡선식에 대한 적용 신뢰성을 확인하였다. 추가적으로 탄소강과 저합금강 배관재에 대해서는 개선된 Bi-linear 응력-변형률 곡선식을 제시하였다.

## 2. JSME CC 초안의 Bi-linear 응력-변형률 곡선식

JSME CC 초안<sup>(11)</sup>에서는 배관계통에 대한 비선형 지진응답해석을 위한 반복경화 모델로 Bi-linear 응력-변형률 곡선에 기초한 이동경화 모델을 권장하고 있으며, 재료의 진응력-진변형률 곡선을 이용하여 Bi-linear 응력-변형률 곡선 결정 절차를 제시하였다. Bi-linear 응력-변형률 곡선은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 진응력-진변형률 곡선에서 항복강도 ( $YS_E$ )와 영률을 이용하여 Bi-linear 곡선의 1차 기울기 ( $E_1$ )와 항복강도 ( $YS_B$ )를 결정한다. Bi-linear 곡선의 2차 기울기

( $E_2$ )는 3% 변형률까지 진응력-진변형률 곡선의 면적과 Bi-linear 곡선의 면적이 같도록 결정한다. 즉, 진응력-진변형률 곡선과 변형에너지가 같도록 Bi-linear 곡선의 2차 기울기를 결정한다. 일본에서 원전 설계시 고려되는 지진하중의 등가 반복회수 (50~300회)에 해당하는 설계 피로 곡선의 변형률 진폭이 0.5~1%이므로, JSME CC를 적용한 지진응답해석에서 고려되는 최대 변형률 진폭이 1%이다.<sup>(13)</sup> 따라서, JSME CC 초안에서는 2차 기울기 결정시 최대 변형률로 3.0%를 제시하였으며, 해석에서 고려되는 변형률에 따라 다른 최대 변형률의 적용도 허용하고 있다.<sup>(11)</sup>

한편, 탄소강과 TP304 및 TP316 스테인리스강 배관재에 대해서는 인장시험 결과가 없을지라도 설계코드<sup>(12)</sup>의 항복강도 ( $S_y$ )와 영률 ( $E$ )을 이용하여 Bi-linear 응력-변형률 곡선을 결정할 수 있는 식을 제시하였다. 즉, 식(1)~(2)와 같이 설계코드의 항복강도와 영률에 항복강도 계수 ( $C_y$ )와 2차 기울기 계수 ( $C_E$ )를 각각 적용하여 Bi-linear 응력-변형률 곡선의 항복강도와 2차 기울기를 결정하며, 식(1)과 (2)에서  $C_y$ 와  $C_E$ 는 재료 별로 식(3)과 (4)로 주어진다.

$$YS_B = S_y \times C_y \quad (1)$$

$$E_2 = E / C_E \quad (2)$$

여기서,

$$C_y = 1.2 \text{ for CS} \quad (3)$$

$$C_y = 2.16 \times 10^{-4} \cdot T + 1.28 \text{ for TP316 SS}$$

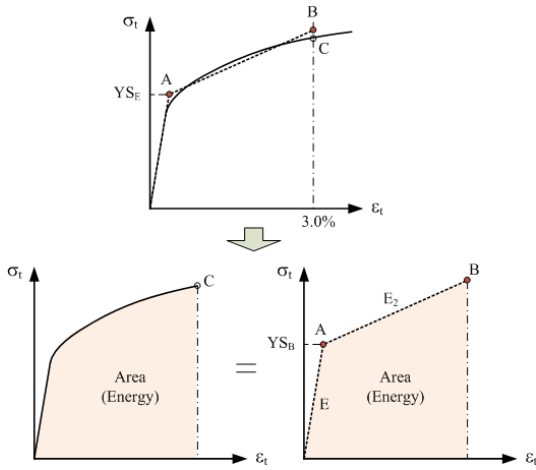
$$C_y = 2.29 \times 10^{-4} \cdot T + 1.24 \text{ for TP304 SS}$$

$$C_E = 100 \text{ for CS} \quad (4)$$

$$C_E = 75 \text{ for TP316 SS}$$

$$C_E = 69 \text{ for TP304 SS}$$

식(3)과 (4)에서 탄소강의 항복강도 계수는 상수 ( $C_y = 1.2$ )로 제시되었으며, 탄소강 배관재에 대한 기존의 시험 데이터와 설계코드의 항복강도 비로부터 결정되었다.<sup>(14)</sup> 2차 기울기 계수 역시 상수 ( $C_E = 100$ )로 선행 연구 결과에 기초한 근사 값으로 결정되었다. TP316과 TP304 스테인리스강의 경우,  $C_y$ 는 각각 온도의 함수로 제시되었으며 425°C 이하에서 적용이 유효하다.  $C_E$ 는 상수로 탄소강 배관재에 비해 약간 작은 값을 갖는다. TP316 및 TP304 스



**Fig. 1** Schematic diagram for determining Bi-linear stress-strain approximation from true stress-true strain curve

테인리스강에 대한  $C_y$ 와  $C_E$ 는 JSME 설계코드<sup>(15)</sup>에서 제공하는 각 온도 별 두 재료의 진응력-진변형률 곡선을 이용하여 Fig. 1의 절차에 따라 결정된 것이다.

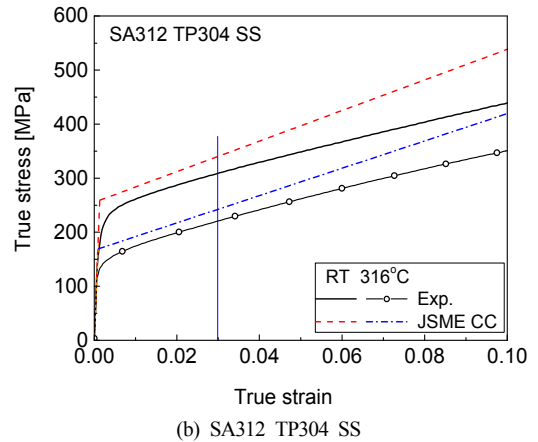
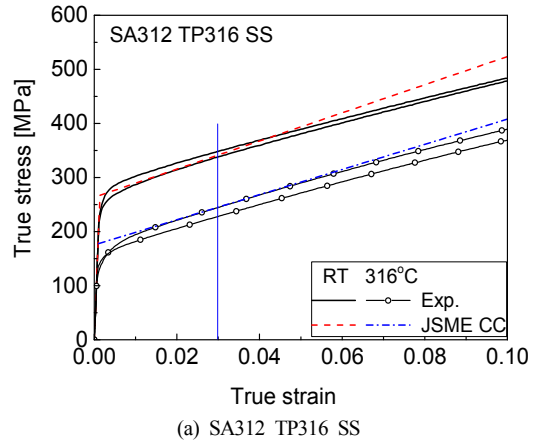
### 3. JSME CC 초안의 Bi-linear 응력-변형률 곡선식 적용성 평가

#### 3.1 오스테나이트계 스테인리스강 배관재

JSME CC 초안<sup>(11)</sup>에서는 TP316과 TP304 스테인리스강 배관재에 대해 설계코드 기반의 Bi-linear 응력-변형률 곡선식을 제시하였다. 여기서는 이들 곡선식의 적용성을 확인하기 위해서, 식(1)~(4)에 의해 결정된 Bi-linear 응력-변형률 곡선을 국내에서 시험된 SA312 TP316과 SA312 TP304 스테인리스강, SA312 TP347 스테인리스강, 그리고 CF8A 주조 스테인리스강(CASS, Cast Austenitic Stainless Steel) 배관재의 진응력-진변형률 곡선과 비교하였다.

##### 3.1.1 SA312 TP316 및 SA312 TP304 스테인리스강 배관재

Fig. 2(a)는 상온과 316°C에서 시험된 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 진응력-진변형률 곡선과 Bi-linear 응력-변형률 곡선을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험 온도에 관계없이 JSME CC 초안에 따라 결정된 TP316 스테인리스강 배관재의 Bi-linear 곡선은 진응력-진변형률 곡선과



**Fig. 2** Comparison of Bi-linear stress-strain curves of SA312 TP316 and TP304 stainless steels determined by JSME CC and their true stress-strain curves

비교적 잘 일치하였다. 반면, SA312 TP304 스테인리스강 배관재의 경우 (Fig. 2(b)), 상온과 316°C에서 Bi-linear 곡선의 기울기는 진응력-진변형률 곡선과 유사하지만 전체적으로 Bi-linear 응력-변형률 곡선이 더 높은 응력을 보였다.

Table 1은 JSME CC 초안에 제시된 TP316과 TP304 스테인리스강의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 진응력-진변형률 곡선에서 직접 구한  $C_y$  및  $C_E$ 와 비교하여 나타난 것이다. SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 경우, JSME CC 초안의  $C_y$ 와  $C_E$ 는 시험 결과에 비해 약간씩 큰 값을 보였으나 차이가 크지 않았다. SA312 TP304 스테인리스강 배관재의 경우에는 시험 결과에서 직접 구한  $C_y$ 와  $C_E$ 에 비해 JSME CC 초안이 더 큰 값을 보였으며, 특히 316°C에서는 차이가 각각 16%와 10%

**Table 1** Comparison of  $C_y$  and  $C_E$  of austenitic stainless steels given by JSME CC and those obtained from experimental data

| Materials      | Temp.[°C] | Design code(12) |             | JSME CC(11)      |          | Experimental data |        |       |
|----------------|-----------|-----------------|-------------|------------------|----------|-------------------|--------|-------|
|                |           | $E$ [GPa]       | $S_y$ [MPa] | $C_y$            | $C_E$    | $YS_E$ [MPa]      | $C_y$  | $C_E$ |
| SA312 TP316 SS | RT        | 195.1           | 205.0       | 1.2854           | 75       | 263.5             | 1.2804 | 70    |
|                | 316       | 174.4           | 130.0       | 1.3483           | 75       | 175.3             | 1.1938 | 74    |
| SA312 TP304 SS | RT        | 195.1           | 205.0       | 1.2457           | 69       | 255.4             | 1.1039 | 66    |
|                | 316       | 174.4           | 127.0       | 1.3124           | 69       | 166.7             | 1.1197 | 61    |
| SA312 TP347 SS | RT        | 195.1           | 207.0       | 1.2854*/1.2457** | 75*/69** | 263.5             | 1.3749 | 73    |
|                | 316       | 174.4           | 147.0       | 1.3483*/1.3124** | 75*/69** | 198.2             | 1.6109 | 73    |
| CF8A CASS      | RT        | 195.1           | 240.0       | 1.2854*/1.2457** | 75*/69** | 299.0             | 1.1575 | 55    |
|                | 316       | 174.4           | 148.0       | 1.3483*/1.3124** | 75*/69** | 194.0             | 1.1939 | 63    |

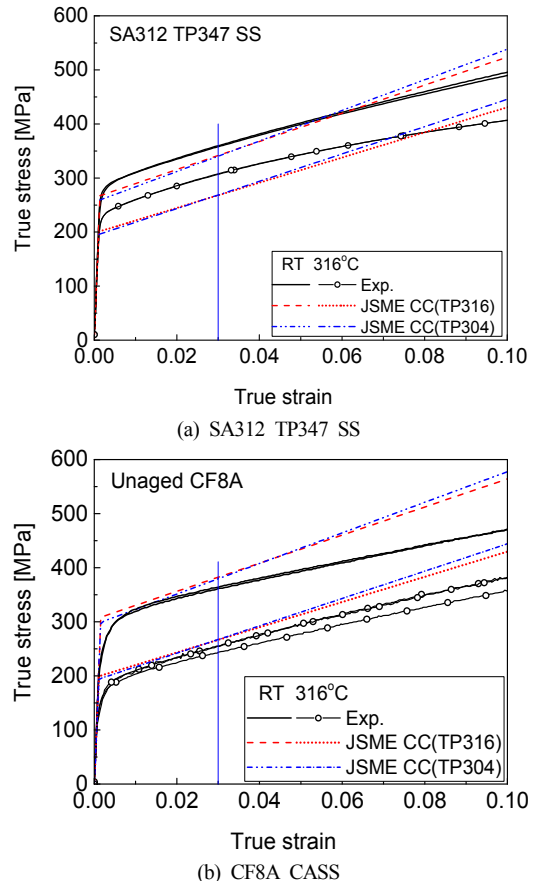
\*SA312 TP316 SS, \*\*SA312 TP304 SS

정도로 컸다. 따라서, SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 경우에는 JSME CC 초안의 Bi-linear 응력-변형을 곡선식의 적용이 적절한 것으로 평가되지만, SA312 TP304 스테인리스강 배관재에 대해서는 Bi-linear 응력-변형을 곡선식의 적용을 위해 추가적인 검토가 필요한 것으로 판단된다.

### 3.1.2 SA312 TP347 및 CF8A 주조 스테인리스강 배관재

JSME CC 초안은 TP347 스테인리스강과 주조 스테인리스강 배관재에 대한 별도의 Bi-linear 응력-변형을 곡선식을 제시하지 않고 있다. 따라서, 여기서는 JSME CC 초안에 제시된 TP316 및 TP304 스테인리스강의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 적용하여 SA312 TP347 스테인리스강과 주조 스테인리스강 배관재에 대한 Bi-linear 응력-변형을 곡선을 결정할 수 있는지 살펴 보았다. 즉, SA312 TP347 스테인리스강과 CF8A 주조 스테인리스강 배관재에 대한 설계코드<sup>(12)</sup>의 항복강도와 영률에 TP316과 TP304 스테인리스강의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 적용하여 Bi-linear 응력-변형을 곡선을 결정하고, SA312 TP347 스테인리스강과 CF8A 주조 스테인리스강 배관재의 진응력-진변형을 곡선과 비교 하였다.

Fig. 3(a)는 Bi-linear 응력-변형을 곡선을 상온과 316°C에서 시험된 SA312 TP347 스테인리스강 배관재의 진응력-진변형을 곡선과 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 시험 온도에서 모두 Bi-linear 응력-변형을 곡선의 기울기는 진응력-진



**Fig. 3** Comparison of Bi-linear stress-strain curves determined by using  $C_y$  and  $C_E$  of TP316 and TP304 stainless steels and true stress-strain curves of SA312 TP347 and CF8A cast austenitic stainless steels

변형률 곡선과 거의 비슷하지만, 전체적으로 Bi-linear 곡선이 진응력-진변형률 곡선에 비해 낮은 응력을 보였다. 특히 상온에 비해 316°C에서 응력 차이가 크게 나타났다. 한편, CF8A 주조 스테인리스강 배관재의 경우(Fig. 3(b))에는 TP316과 TP304 스테인리스강의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 적용하여 구한 Bi-linear 곡선이 시험 온도에 관계없이 전체적으로 CF8A 주조 스테인리스강 배관재의 진응력-진변형률 곡선에 비해 높은 응력을 보였다.

Table 1에서 JSME CC 초안에 제시된 TP316과 TP304 스테인리스강의  $C_y$  및  $C_E$ 와 SA312 TP347 스테인리스강 배관재의 진응력-진변형률 곡선에서 직접 구한  $C_y$ 와  $C_E$ 를 정량적으로 비교하면,  $C_E$ 는 거의 유사하지만  $C_y$ 는 TP316과 TP304 스테인리스강에 비해 TP347 스테인리스강에서 뚜렷이 높은 값(8~23%)을 보였다. 한편, CF8A 주조 스테인리스강 배관재의  $C_y$ 와  $C_E$ 는 JSME CC 초안에 제시된 TP316과 TP304 스테인리스강의  $C_y$  및  $C_E$ 에 비해 10~20% 정도 낮은 값을 보였다. 따라서, 비록 SA312 TP347 스테인리스강과 CF8A 주조 스테인리스강 배관재가 오스테나이트계 스테인리스강이지만, JSME CC 초안에 제시된 TP316과 TP304 스테인리스강의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 적용하여 이들 배관재에 대한 Bi-linear 응력-변형률 곡선을 결정하는 데는 한계가 있는 것으로 판단된다.

### 3.2 탄소강 및 저합금강 배관재

#### 3.2.1 SA106 Gr.B 및 SA106 Gr.C 탄소강 배관재

Fig. 4는 JSME CC 초안에 제시된 탄소강 배관재의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 적용하여 구한 Bi-linear 응력-변형률 곡선과 상온과 289°C에서 시험된 SA106 Gr.B와 SA106 Gr.C 탄소강 배관재의 진응력-진변형률 곡선을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두 재료 모두 상온에서는 Bi-linear 응력-변형률 곡선이 3% 이내의 변형률 범위에서 시험 데이터를 비교적 잘 예측하였다. 그러나, 289°C 조건에서는 두 재료 모두 Bi-linear 곡선이 진응력-진변형률 곡선에 비해 높은 항복강도와 낮은 기울기를 보였다.

Table 2는 JSME CC 초안의 탄소강에 대한  $C_y$ 와  $C_E$ 를 시험에서 직접 구한 SA106 Gr.B와 SA106 Gr.C 탄소강 배관재의  $C_y$  및  $C_E$ 와 비교하여 나타낸 것이다. 상온에서는 두 재료 모두 JSME CC 초안의  $C_y$ 가 시험에서 구한  $C_y$ 와 거의 일치하였고,  $C_E$ 는

재료 종류에 따라 다른 경향을 보였다. SA106 Gr.B 탄소강에서는 JSME CC 초안의  $C_E$ 가 시험 데이터에서 구한  $C_E$ 보다 작은 반면, SA106 Gr.C 탄소강에서는 JSME CC 초안의  $C_E$ 가 시험 결과보다 8% 정도 더 큰 값을 보였다. 한편, 289°C에서는 두 재료에서 모두 JSME CC 초안의  $C_y$ 와  $C_E$ 이 시험 데이터에서 구한  $C_y$ 와  $C_E$ 에 비해 각각 17%와 400~500% 정도 큰 값을 보였다. 따라서, 상온 조건에서는 JSME CC 초안이 어느 정도 신뢰성 있는 탄소강 배관재의 Bi-linear 응력-변형률 곡선을 제공하지만, 원전 배관의 운전온도에서는 JSME CC 초안의 Bi-linear 응력-변형률 곡선식이 탄소강 배관재의 응력-변형률 거동을 적절히 나타내지 못하는 것을 알 수 있다.

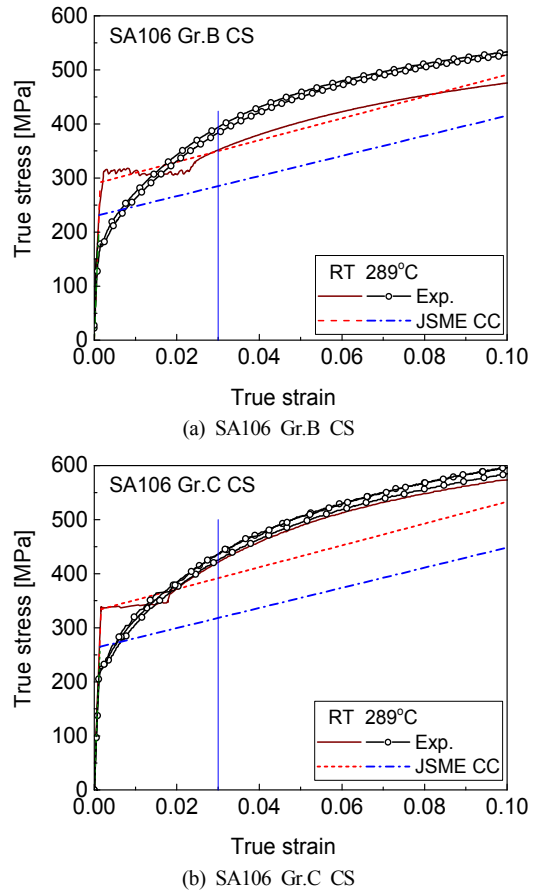


Fig. 4 Comparison of Bi-linear stress-strain curves of carbon steels determined by JSME CC and true stress-strain curves of SA106 Gr.B and Gr.C carbon steels

**Table 2** Comparison of  $C_y$  and  $C_E$  for carbon steels given by JSME CC and those obtained from the experimental data

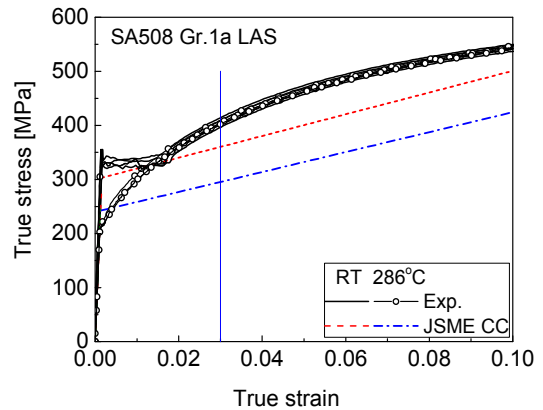
| Materials       | Temp.[°C] | Design code(12) |             | JSME CC(11) |        |              | Experimental data |       |
|-----------------|-----------|-----------------|-------------|-------------|--------|--------------|-------------------|-------|
|                 |           | $E$ [GPa]       | $S_y$ [MPa] | $C_y$       | $C_E$  | $YS_E$ [MPa] | $C_y$             | $C_E$ |
| SA106 Gr.B CS   | RT        | 203.4           | 241.0       | 1.2         | 100    | 295.4        | 1.2255            | 137.9 |
|                 | 289       | 186.0           | 191.0       | 1.2         | 100    | 195.8        | 1.0270            | 25.6  |
| SA106 Gr.C CS   | RT        | 203.4           | 275.0       | 1.2         | 100    | 334.8        | 1.2175            | 92.5  |
|                 | 289       | 186.0           | 218.5       | 1.2         | 100    | 226.5        | 1.0366            | 21.5  |
| SA508 Gr.1a LAS | RT        | 201.0           | 250.0       | 1.2***      | 100*** | 325.2        | 1.3008            | 103.5 |
|                 | 286       | 186.1           | 200.0       | 1.2***      | 100*** | 245.8        | 1.2290            | 33.5  |

\*\*\*Carbon Steel

### 3.2.2 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재

저합금강 배관재에 대해서는 JSME CC 초안이 Bi-linear 응력-변형을 곡선식을 제시하지 않고 있다. 여기서는 JSME CC 초안에 제시된 탄소강 배관재의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 적용하여 저합금강 배관재의 Bi-linear 응력-변형을 곡선을 구할 수 있는지 살펴보았다. 즉, SA508 Gr.1a 저합금강 배관재에 대한 설계코드<sup>(12)</sup>의 항복강도와 영률에 식(1)~(4)로 주어진 탄소강 배관재의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 적용하여 Bi-linear 응력-변형을 곡선을 구하고, 상온과 286°C에서 시험된 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 진응력-진변형을 곡선과 비교하였다. Fig. 5는 상온과 286°C에서 Bi-linear 응력-변형을 곡선과 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 진응력-진변형을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험 온도에 관계없이 Bi-linear 응력-변형을 곡선은 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 진응력-진변형을 곡선에 비해 낮은 항복강도를 보였으며, 286°C에서는 진응력-진변형을 곡선에 비해 Bi-linear 곡선의 기울기가 상당히 낮았다.

Table 2에서 JSME CC 초안의 탄소강 배관재에 대한  $C_y$  및  $C_E$ 와 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 시험 데이터에서 직접 구한  $C_y$  및  $C_E$ 를 비교하면, 상온에서는 거의 유사한 값을 보였다. 286°C에서도  $C_y$ 는 유사한 값을 보였으나,  $C_E$ 는 큰 차이를 보였다. JSME CC 초안에 제시된 탄소강 배관재의  $C_E$ 는 실제 시험 데이터에서 구한  $C_E$ 에 비해 약 300% 정도 큰 값을 보였다. 따라서, 상온에서는 JSME CC 초안에 제시된 탄소강 배관재의 Bi-linear 곡선식을 적용하여 저합금강 배관재의 Bi-linear 응력-변형을 곡선을 결정하는 것이 어느 정도 타당하지만, 원전 운전



**Fig. 5** Comparison of Bi-linear stress-strain curves of carbon steel determined by JSME CC and true stress-strain curves of SA508 Gr.1a low-alloy steel

온도에서는 저합금강 배관재의 Bi-linear 응력-변형을 곡선을 결정하는데 한계가 있는 것으로 판단된다.

### 3.3 비선형 지진해석 결과에 미치는 영향 검토

앞서 JSME CC 초안에 따라 결정된 Bi-linear 곡선과 각 배관 재료의 진응력-진변형을 곡선을 비교한 결과, TP316 스테인리스강 배관재의 Bi-linear 곡선은 진응력-진변형을 곡선과 비교적 잘 일치하였다. 그러나, TP304 및 TP347 스테인리스강과 주조 스테인리스강 배관재의 경우에는 Bi-linear 곡선의 기울기는 진응력-진변형을 곡선과 유사하지만, 항복강도는 진응력-진변형을 곡선에 비해 높거나 낮은 것으로 확인되었다. 또한, 탄소강과 저합금강 배관재의 경우, 상온에서는 탄소강의 Bi-linear 곡선이 두 재료의 진응력-진변형을 곡선과 비교적 잘 일치하였다. 그러나,



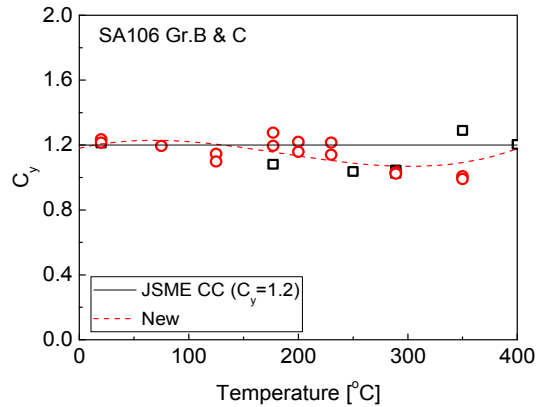
운전온도에서는 Bi-linear 응력-변형률 곡선이 진응력-진변형률 곡선에 비해 높은 항복강도와 낮은 기울기를 보였다.

JSME CC 개발 과정에 수행된 벤치마크 해석과 변수해석 결과에 의하면,<sup>(11,16)</sup> Bi-linear 곡선 기반의 이동경화 모델을 적용한 비선형 지진응답해석 결과는 Bi-linear 곡선의 항복강도에 크게 영향을 받지만, 배관계통의 응답거동에 미치는 Bi-linear 곡선의 2차 기울기 영향은 미미한 것으로 확인되었다. 이들 결과에 의하면, 낮은 항복강도를 갖는 Bi-linear 곡선의 적용은 소성변형에 의한 댐핑 효과를 증가시켜 배관계통의 지진응답을 감소시키는 것으로 평가되었다. 한편, 응답가속도와 변형 등 배관계통의 거시적 응답거동에 미치는 Bi-linear 곡선의 2차 기울기 영향은 미미하지만, 낮은 2차 기울기의 적용은 지진하중 조건에서 변형률 진폭을 증가시키는 것으로 평가되었다. 따라서, 진응력-진변형률 곡선과 비교하여 Bi-linear 응력-변형률 곡선의 항복강도가 높고 2차 기울기가 낮은 경우에 배관계통의 지진해석 결과가 더 보수적인 것으로 판단된다. 그러나, 지진해석 결과에 미치는 영향을 보다 구체적으로 파악하기 위해서는 앞서 구한 Table 1과 Table 2의 결과를 이용한 배관계통에 대한 지진응답해석을 수행하는 것이 필요하다.

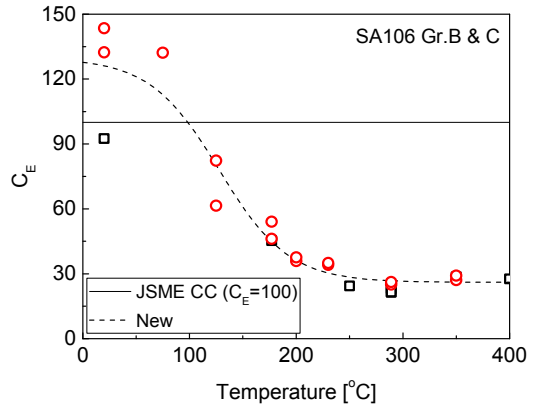
#### 4. 개선된 Bi-linear 응력-변형률 곡선식 제안

앞서 살펴본 바와 같이 탄소강 배관재의 경우에 상온에서는 JSME CC 초안의 Bi-linear 응력-변형률 곡선식이 실제 시험 데이터와 비교적 잘 일치하지만, 고온에서는 Bi-linear 응력-변형률 곡선이 실제 탄소강 배관재의 응력-변형률 거동을 적절히 예측하지 못했다. 이것은 탄소강 배관재의 강도와 변형 거동이 시험 온도에 크게 의존함에도 불구하고, JSME CC 초안에서는  $C_y$ 와  $C_E$ 에 온도 영향이 고려되어 있지 않기 때문으로 판단된다. 이러한 특성은 저합금강 배관재에서도 유사한 것으로 판단된다. 따라서, 여기서는 다양한 온도에서 시험된 SA106 Gr.B 및 SA106 Gr.C 탄소강 배관재와 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 인장시험 데이터를 이용하여 Fig. 1의 절차에 따라 각 재료의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 구하고,  $C_y$ 와  $C_E$ 의 온도 의존성을 살펴보았다.

Figs. 6과 7은 탄소강 배관재와 저합금강 배관재의 진응력-진변형률 곡선에서 구한  $C_y$ 와  $C_E$ 를 온도에



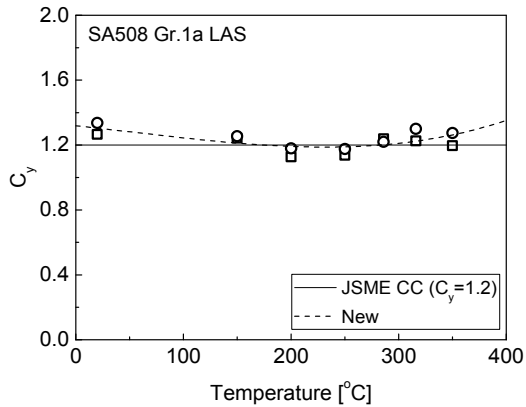
(a) Yield strength coefficient



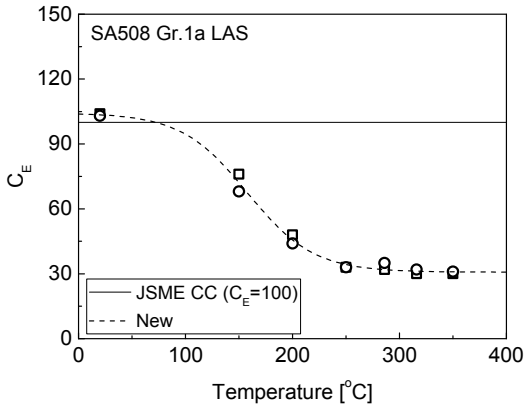
(b) Secondary slope coefficient

Fig. 6 Proposed new  $C_y$  and  $C_E$  for carbon steel piping material

따라 나타난 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 온도에 따른  $C_y$ 와  $C_E$ 의 변화 경향은 두 재료에서 거의 유사하게 관찰되었다. 즉,  $C_y$ 는 온도에 따른 변화가 크지 않지만, 온도가 증가함에 따라 약간씩 감소하다 일정 온도 이상에서 다시 증가하는 경향을 보였다.  $C_E$ 의 경우에는 온도가 증가함에 따라 크게 감소한 후 250°C 이상에서는 거의 일정한 값에 수렴하는 경향을 보였다. 따라서, 탄소강과 저합금강 배관재에 대한 신뢰성 있는 Bi-linear 응력-변형률 곡선식을 얻기 위해서는 온도 영향이 반영된  $C_y$ 와  $C_E$ 의 적용이 필요한 것을 알 수 있다. 여기서는 Figs. 6과 7의 결과를 곡선 접합하여  $C_y$ 와  $C_E$ 를 온도의 함수로 제시하였다. 식(5)와 (6)은 곡선접합 결과로부터 구한 탄소강과 저합금강 배관재의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 나타낸 것이다.



(a) Yield strength coefficient



(b) Secondary slope coefficient

**Fig. 7** Proposed new  $C_y$  and  $C_E$  for low-alloy steel piping material

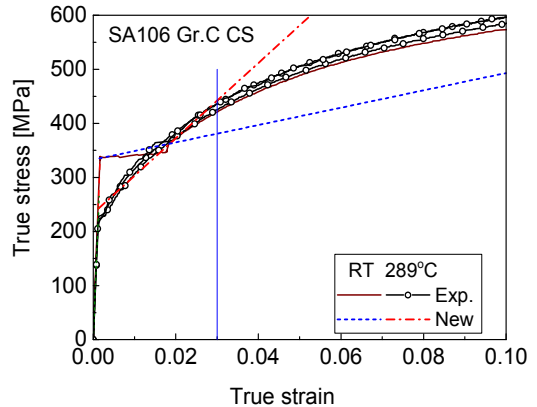
$$C_y = 1.18081 + 0.00154 \cdot T - 1.39136 \times 10^{-5} \cdot T^2 + 2.51127 \times 10^{-8} \cdot T^3 \quad \text{for CS} \quad (5)$$

$$C_y = 1.3188 - 6.84933 \cdot T - 1.42099 \times 10^{-6} \cdot T^2 + 8.34324 \times 10^{-9} \cdot T^3 \quad \text{for LAS}$$

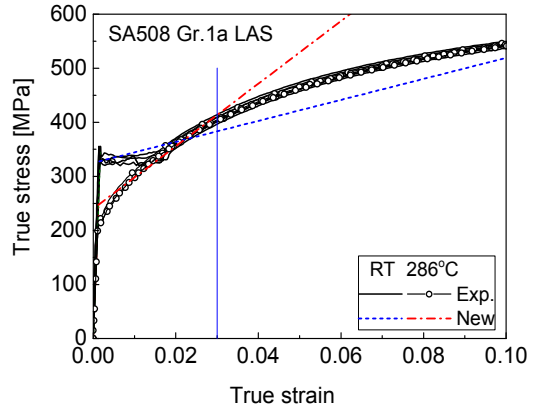
$$C_E = 26.05822 + \frac{103.67447}{[1 + 10^{(127.92257 - T) \times -0.01338}]} \quad \text{for CS} \quad (6)$$

$$C_E = 30.76721 + \frac{73.55456}{[1 + 10^{(157.66432 - T) \times -0.01408}]} \quad \text{for LAS}$$

Fig. 8은 본 논문에서 제안한 식(5)와 (6)의  $C_y$ 와  $C_E$ 를 적용하여 구한 SA106 Gr.C 탄소강 배관재와 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 Bi-linear 응력-변형률 곡선을 각 재료의 진응력-진변형률 곡선과 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험 온도에



(a) SA106 Gr.C CS



(b) SA508 Gr.1a LAS

**Fig. 8** Comparison of Bi-linear stress-strain curves determined by proposed model and true stress-strain curves

관계없이 식(5)와 (6)을 적용하여 결정한 Bi-linear 응력-변형률 곡선은 실제 탄소강과 저합금강 배관재의 응력-변형률 거동을 잘 예측하였다. 특히 JSME CC 초안의 Bi-linear 응력-변형률 곡선 (Figs. 4와 5)과 비교할 때, 원전 운전온도 조건에서 Bi-linear 응력-변형률 곡선의 신뢰성이 크게 향상된 것을 알 수 있다. 다만, Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 3% 이상의 변형률 영역에서는 Bi-linear 곡선이 진응력-진변형률 곡선과 큰 차이를 보였다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같이 JSME CC을 적용한 지진응답해석에서 고려되는 최대 변형률 진폭이 1%이므로 3% 이상의 변형률 영역에서 Bi-linear 곡선과 진응력-진변형률 곡선의 차이는 해석 결과에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단된다.



## 5. 종합정리

본 논문에서는 JSME CC 초안에 제시된 각 재료 별 Bi-linear 응력-변형률 곡선식의 적용 신뢰성을 확인하기 위해서, 각 재료 별로 JSME CC 초안에 따라 결정된 Bi-linear 응력-변형률 곡선과 인장시험에서 주어진 진응력-진변형률 곡선을 비교하였다. 추가적으로 탄소강과 저합금강 배관재에 대해서는 재선된 Bi-linear 응력-변형률 곡선 결정식을 제시하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) JSME CC 초안의 Bi-linear 응력-변형률 곡선 결정식이 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 응력-변형률 거동은 적절히 예측하지만, SA312 TP304 스테인리스강 배관재의 응력-변형률 거동은 적절히 예측하지 못했다.

2) JSME CC 초안에 제시된 TP316 및 TP304 스테인리스강의 Bi-linear 응력-변형률 곡선식을 적용하여 SA312 TP347 및 CF8A 주조 스테인리스강 배관재의 Bi-linear 응력-변형률 곡선을 결정하는데 한계가 있는 것으로 확인되었다.

3) 상온에서는 JSME CC 초안의 Bi-linear 응력-변형률 곡선식이 탄소강 배관재의 응력-변형률 거동을 비교적 잘 예측하지만, 원전 운전온도에서는 탄소강 배관재의 응력-변형률 거동을 적절히 나타내지 못했다.

4) 상온에서는 탄소강 배관재에 대한 JSME CC 초안의 Bi-linear 응력-변형률 곡선식이 저합금강 배관재의 Bi-linear 응력-변형률 곡선 결정에 적용될 수 있으나, 원전 운전온도에서는 저합금강 배관재의 Bi-linear 응력-변형률 곡선 결정에 적용할 수 없는 것으로 확인되었다.

5) 탄소강과 저합금강 배관재에 대한 개선된 Bi-linear 응력-변형률 곡선식은 상온뿐 아니라 원전 운전온도에서 탄소강과 저합금강 배관재의 응력-변형률 거동을 적절히 예측하였다.

## 후 기

본 논문은 2017년도 산업통상자원부 (MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제의 결과입니다. (No.20171510 102050)

## 참고문헌

- (1) Saji, G., 2014, "Safety goals for seismic and tsunami risks: Lessons learned from the Fukushima Daiichi disaster," *Nucl. Eng. Des.*, Vol.280, pp.449-463.
- (2) Stevenson, J.D., 2014, "Summary of the historical development of seismic design of nuclear power plants in Japan and the U.S.," *Nucl. Eng. Des.*, Vol.269, pp.160-164.
- (3) IAEA, 2016, "Consideration of the application of the IAEA safety requirements for the design of nuclear power plants," International Atomic Energy Agency, Vienna, *IAEA TECDOC-1791*.
- (4) ASME BPVC Sec. III Div.1 Sub. NB, 2007, "Rules for Construction of Nuclear Facility Components," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (5) Donavin, P.R., 2016, "Technical Basis for Proposed ASME Section XI Code Case on Beyond Design Bases Earthquake," *Proc. of ASME 2016 PVP Conference*, Vancouver, BC, July 17-21, PVP2016-63827.
- (6) Nakamura, I. and Kasahara, N., 2015, "Excitation tests on elbow pipe specimens to investigate failure behavior under excessive seismic loads," *Proc. of ASME 2015 PVP Conference*, Boston, MA, July 19-23, PVP2015-45711.
- (7) OECD/NEA, 2015, "Interim Report on Metallic Components Margins under High Seismic Loads," Nuclear Energy Agency, Paris, *NEA/CSNI/R(2015)8*.
- (8) Paul, S. K. Sivaprasad, S., Dhar, S., and Tarafder, S., 2011, "Key issues in cyclic plastic deformation: Experimentation," *Mech. of Mater.*, Vol.43, pp.705-720.
- (9) Jeon, D. S., Kang, J. Y., Huh, N. S., Kim, J. S., and Kim, Y. J., 2017, "Effects of Hardening Models on Cyclic Deformation Behavior of Tensile Specimen and Nuclear Piping System," *Trans. of the KPVP*, Vol.13, No.2, pp.67-74.
- (10) Chaboche, J. L., Dnag Van, K., and Gordier, G., 1979, "Modelization of the Strain Memory Effect on the Cyclic Hardening of 316 Stainless Steel," *Proc. of 5th Int. Conference on SMiRT*, Div.L, Berlin, Germany.
- (11) Otani, A., Shibutani, T., Morishita, M., Nakamura, I., Watanabe, T., and Shiratori, M., 2017, "Seismic Qualification of Piping System by Detailed Inelastic Response Analysis Part 2. A Guideline for Piping Seismic Inelastic Response Anlysis," *Proc. of ASME 2017 PVP Conference*, Waikoloa, HI, July 16-20, PVP2017-65190.

- (12) ASME BPVC Sec. II Part D, 2010, "Properties Materials," American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (13) Morishita, M, Otani, A., Watanabe, T., Nakamura, I., Shibutani, T., and Shiratori, M., 2017, "Seismic Qualification of Piping System by Detailed Inelastic Response Analysis Part 1. A Code Case for Piping Sesimic Evaluation Based on Detailed Inelastic Response Analysis," *Proc. of ASME 2017 PVP Conference*, Waikoloa, HW, July 16-20, PVP2017-65166.
- (14) Nara, K., Nakamura, K., Yasunami, H., Kawabata, F., and Shiwaku, T., 2004, "Statistic investigation for thickness and strength of structural steel plate used for bridge," *J. of Jap. Soc. Civ. Eng.*, No.752/1-66, pp.299-310 (in Japanese).
- (15) JSME, 2015, "Code for nuclear power generation facilities: rules on design and construction for nuclear power plants", Japanese Society of Mechanical Engineers, *JSME SNCI-2015*(in Japanese).
- (16) Nakamura, I, Otani, A., Morishita, M, Shiratori, M., Watanabe, T., and Shibutani, T., 2017, "Seismic Qualification of Piping System by Detailed Inelastic Response Analysis Part 3 - Variation in Elastic-Plastic Analysis Results on Carbon Steel Pipes from the Benchmark Analyses and the Parametric Analysis," *Proc. of ASME 2017 PVP Conference*, Waikoloa, HW, July 16-20, PVP2017-65316.