

# Development of PWSCC Initiation Model for Alloy 182 Welds Considering Thermal Aging and Cold Work Effects

2020년 추계 한국원자력학회, Online Conference  
2020. 12. 17. (Thu.)

박재필, 반치범  
부산대학교 기계공학부

유승창, 김지현  
울산과학기술원 기계항공 및 원자력공학부

# 목 차

- 서 론
- 열적시효/냉간가공이 182 용접재에 미치는 영향
- PWSCC Initiation Time 모델 개발
- 결론 및 요약

# 서론

## ■ 연구배경

- ✓ Alloy 182 용접재는 Alloy 600 모재와 비교하여 미세조직이 다르고 용접잔류응력이 존재
  - Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC) 저항성이 더 낮음

- ✓ xLPR code에서는 182 용접재의 PWSCC initiation time model로 2가지를 제시 [1]

- Stress-Power model

$$t_i \propto \sigma^{-n} \cdot e^{Q/RT}$$

- PWSCC initiation time ( $t_i$ )은 응력( $\sigma$ ), 온도( $T$ )의 함수
- 형태가 간단하나 열처리/냉간가공 효과를 고려할 수 없음

- Garud model

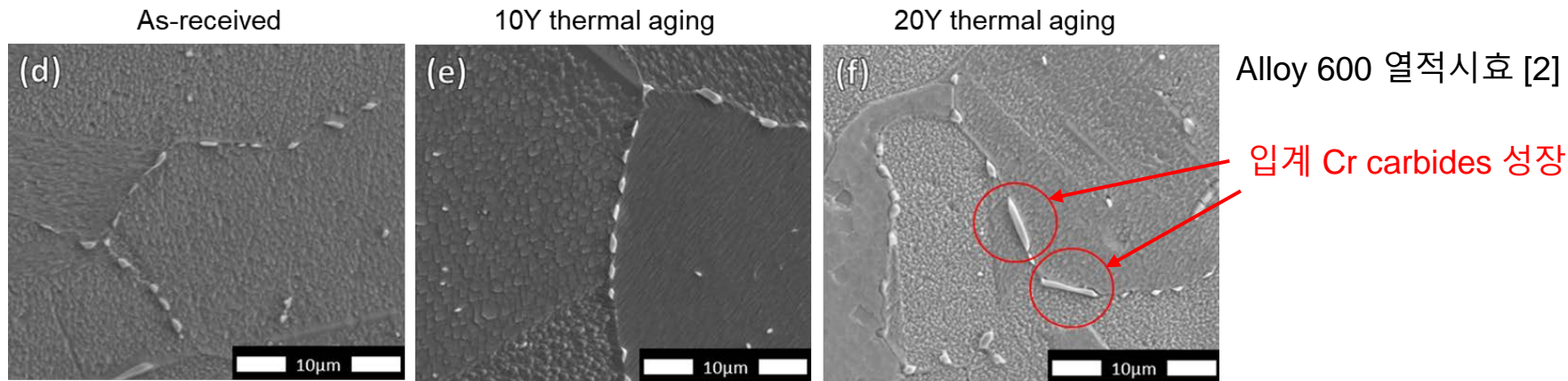
$$t_i \propto \ln(A) \frac{\ln\left(\frac{A-z}{\frac{\sigma}{YS_{RT}} - z}\right)}{\ln\left(\frac{A-z}{1-z}\right)} \frac{1}{m^q} \cdot e^{Q/RT}$$

- PWSCC initiation time ( $t_i$ )은 응력( $\sigma$ ), 상온인장 물성( $YS_{RT}$ ,  $UTS_{RT}$ ), 온도( $T$ )의 함수
- 다소 복잡하고 많은 parameter(10개)가 필요하나 열처리/냉간가공 효과를 고려할 수 있음
- 단, 182 용접재에 대한 parameter 값은 제시되지 않았음

# 서론

## ■ 열적시효(Thermal Aging)

- ✓ Alloy 600/182 재료에 대해서는 intermetallic  $\gamma'$  으로 인한 hardening은 발생하지 않음
- ✓ 단, **Cr carbide 성장**으로 인해 기계적물성이 바뀔 수 있음
- ✓ 182 용접재에 대해서는 열적시효가 PWSCC 저항성에 미치는 영향이 연구된 바 없음



## ■ 냉간가공(Cold Work)

- ✓ 일반적으로 재료의 PWSCC 저항성을 약화시킨다고 알려짐
- ✓ Garud model을 사용하면 냉간가공이 PWSCC 저항성에 미치는 영향을 고려할 수 있으나 182 용접재에 대한 parameter는 알려지지 않음

# 서론

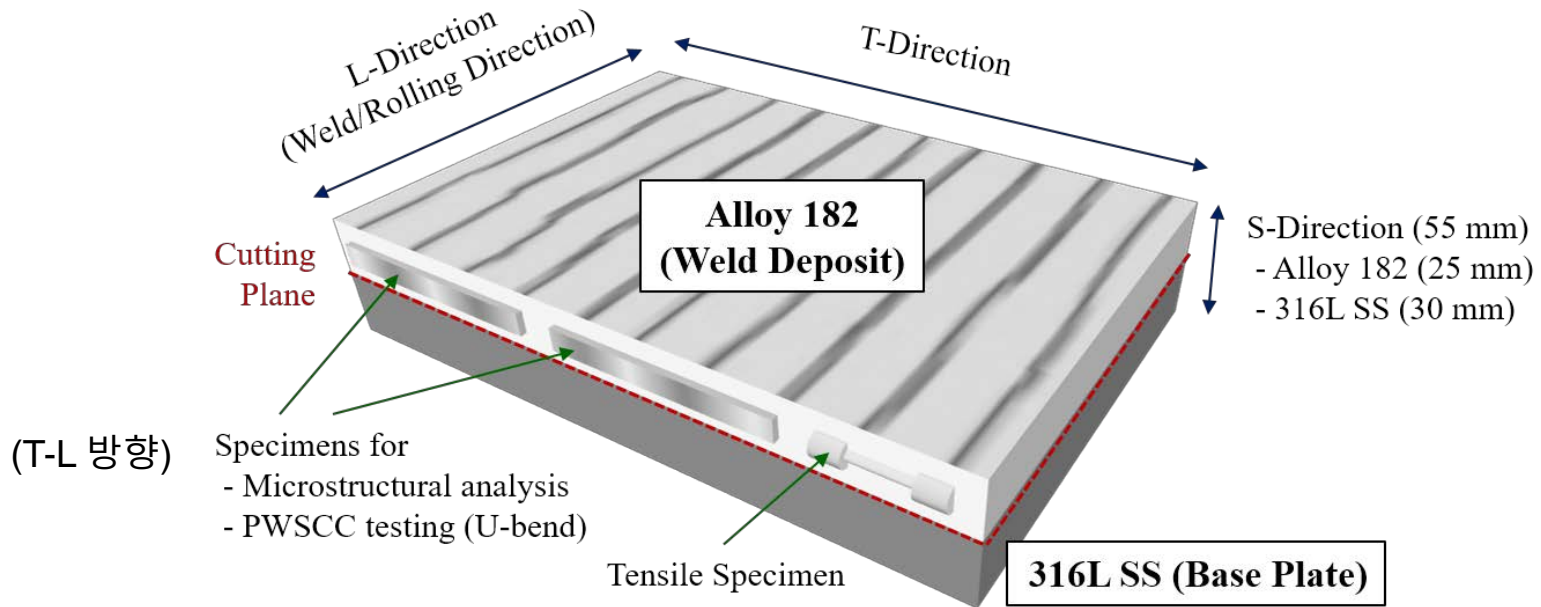
## ■ 연구목표

- ✓ 열적시효/냉간가공이 182 용접재에 미치는 영향 실험
  - 미세조직
  - 기계적 물성
  - PWSCC initiation 저항성
  
- ✓ 열적시효/냉간가공 효과를 고려할 수 있는 PWSCC initiation time 모델 개발
  - (182 용접재에 대한) Garud model parameter 추정
  - 소성에너지에 기반한 새로운 형태의 empirical 모델 제시

# 열적시효/냉간가공이 182 용접재에 미치는 영향

## ■ 재료 및 시편 준비

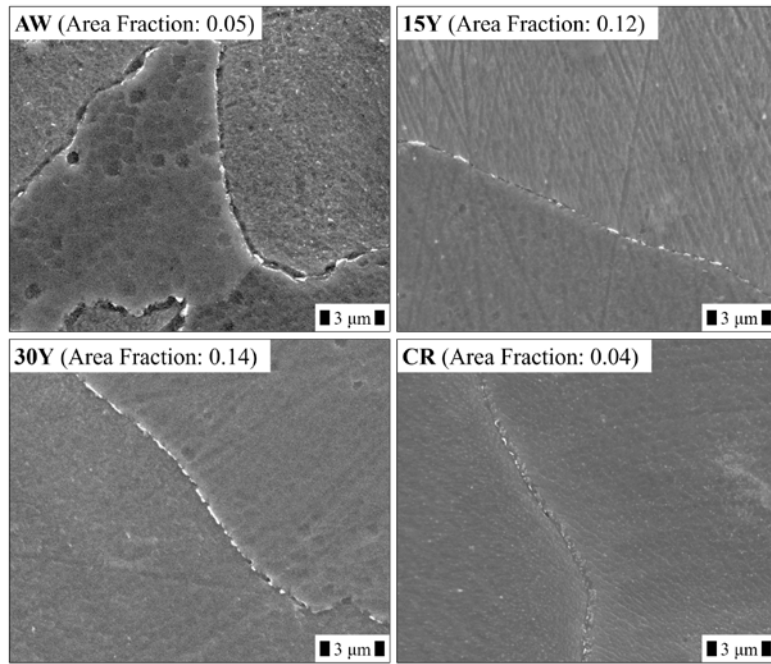
- ✓ 316L SS plate 위에 Alloy 182 weld deposit
- ✓ 4개의 Post processing 조건 →
  1. As-welded (AW)
  2. 15년 상당 열적시효 (15Y)
  3. 30년 상당 열적시효 (30Y)
  4. 20% 냉간압연 (CR)
- 열적시효 가속 열처리온도: 400 °C
- Activation energy: 180 kJ/mol (= Cr 확산의 활성화 에너지)



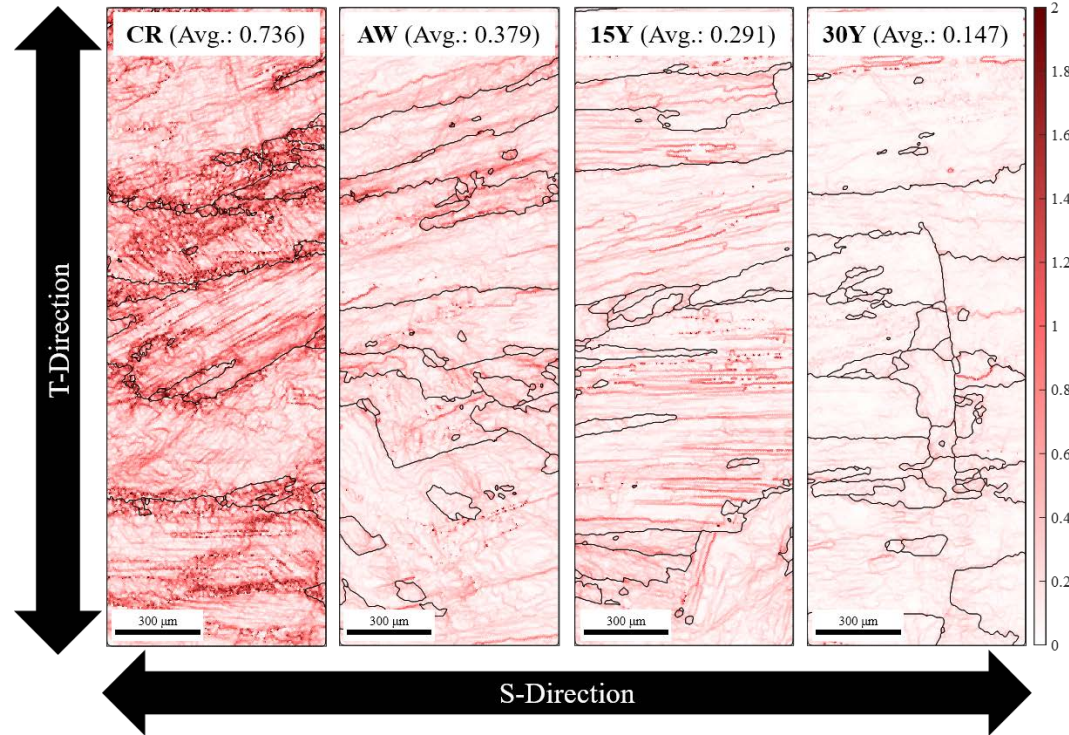
# 열적시효/냉간가공이 182 용접재에 미치는 영향

## ■ 미세조직 분석결과

- ✓ Dendrite 구조, 열적시효에 의한 결정립 크기 변화 없음
  - 열적시효 → 결정립계 **Cr carbide** ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) **성장**, **기존 용접 잔류변형 감소**
  - 냉간가공 → 결정립계 국부 잔류변형 (geometrically necessary dislocation) **증가**



SEM, Grain Boundary Precipitates



EBSD, Kernel Average Misorientation (KAM)

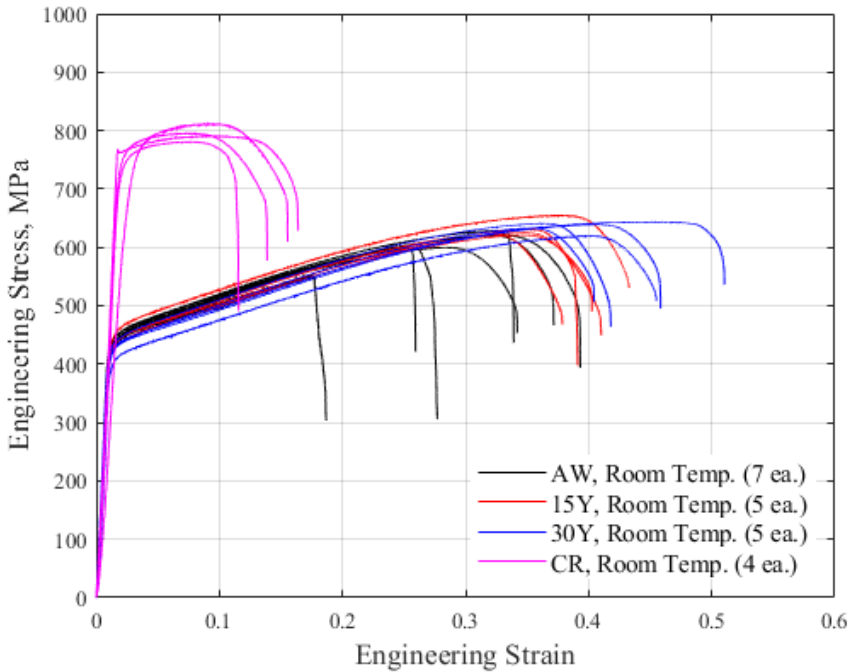
# 열적시효/냉간가공이 182 용접재에 미치는 영향

## ■ 기계적 물성 측정결과

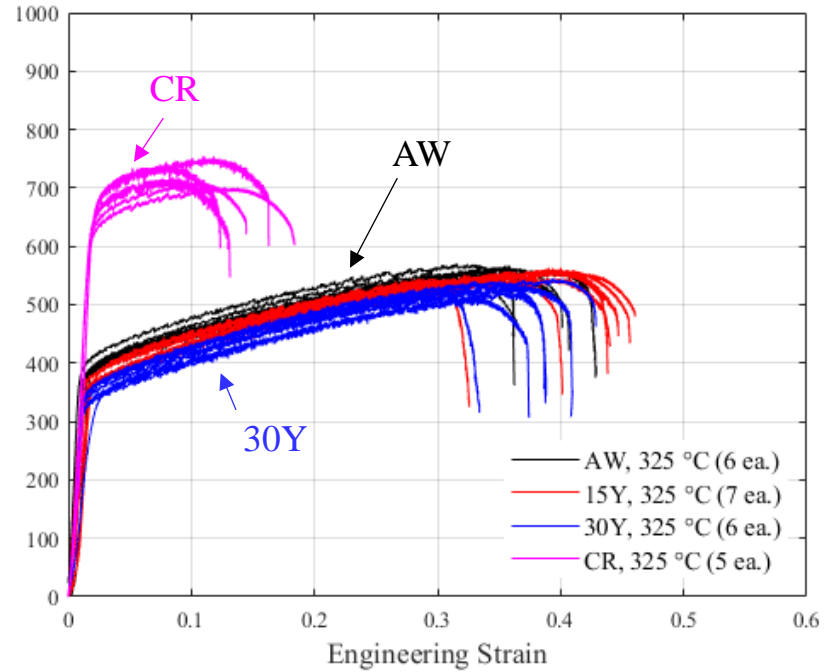
✓ 상온 및 325 °C 인장시험 (ASTM E8/E8M)

- 열적시효 → (325 °C 에서) **강도 감소, 연신율 감소** (30Y 시편)
- 냉간가공 → 강도 증가, 연신율 감소

→ 성장한 Cr carbide가 주로 입계석출물이므로 석출강화효과는 미미, 잔류변형감소 인한 강도저하, 조대화된 석출물로 연신율 감소



상온 인장시험 결과



325 °C 인장시험 결과

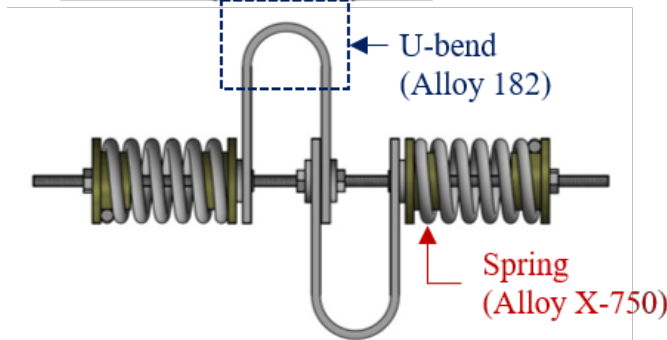
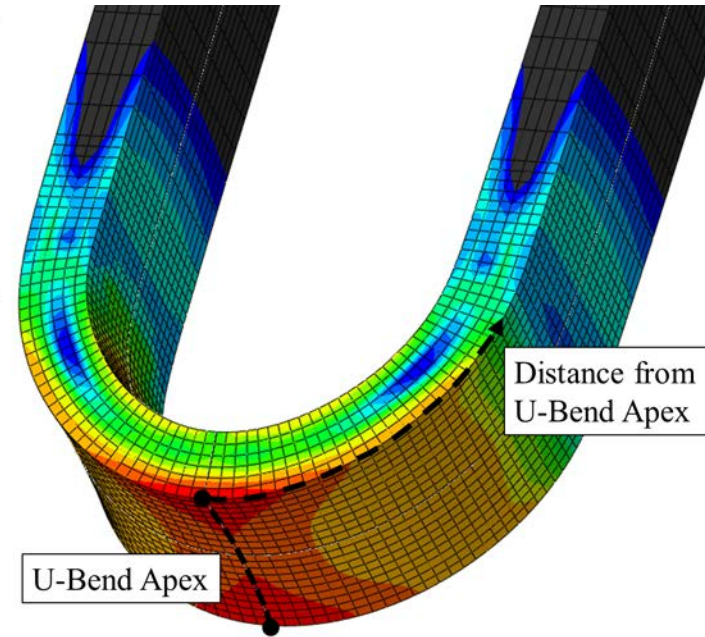
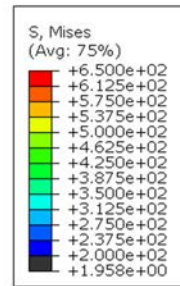
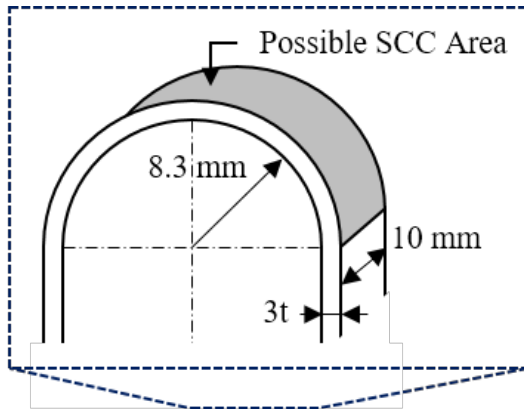


# 열적시효/냉간가공이 182 용접재에 미치는 영향

## ■ PWSCC Initiation 시험

- ✓ U-bend 시험 (ASTM G30), 총 46개 시편 →
- ✓ 작용 응력은 유한요소해석(ABAQUS)으로 계산
  - (작용 응력) CR > AW > 15Y > 30Y

조건	시편 개수
AW	16
15Y	10
30Y	10
CR	10



U-bend 시편 형상

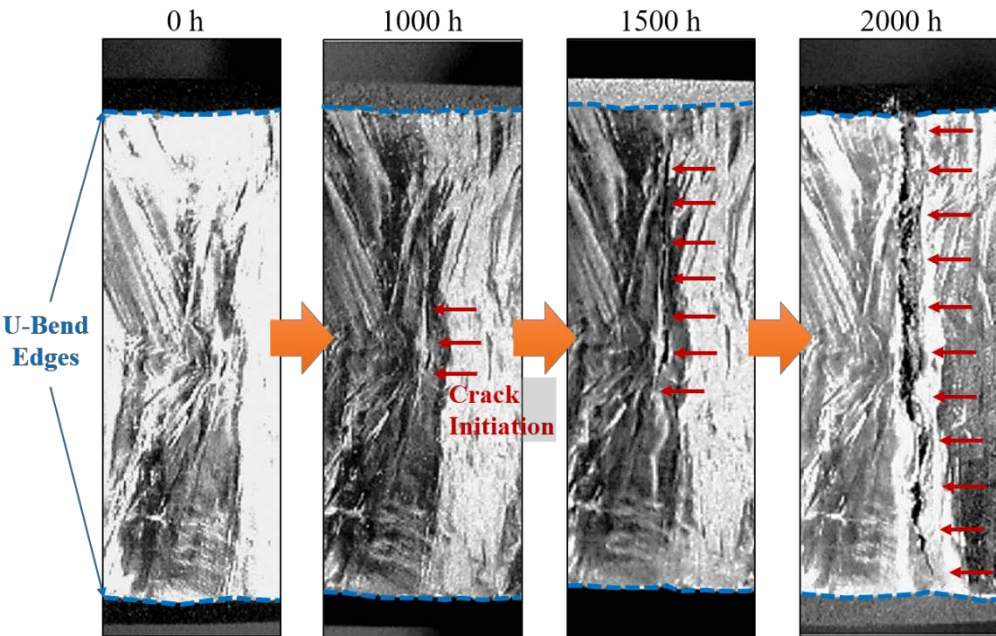
유한요소해석 응력해석 결과예시

# 열적시효/냉간가공이 182 용접재에 미치는 영향

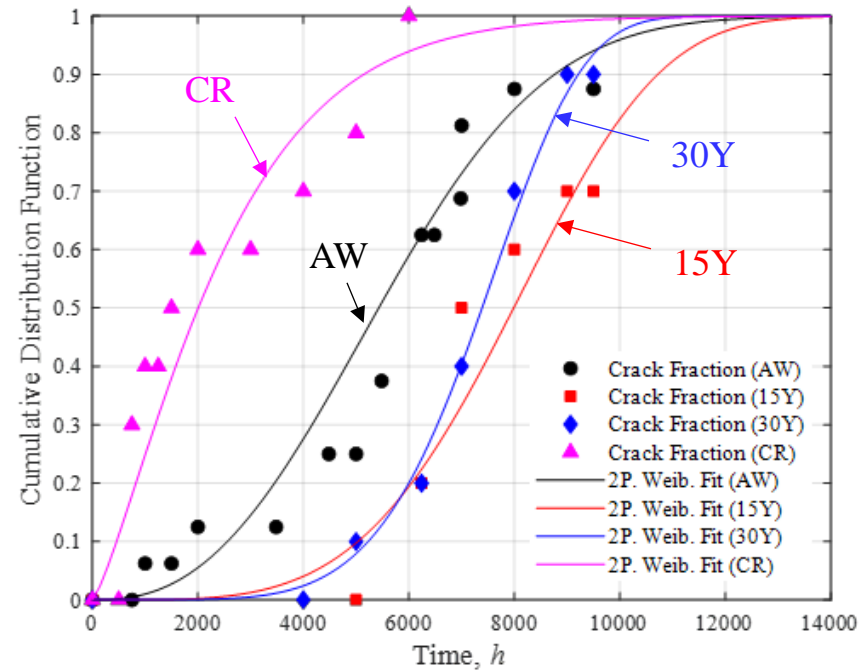
## PWSCC Initiation 시험결과

Stress-power model:  
 $t_i \propto \sigma^{-n}$

- ✓ 시험환경: PWR 1차수환경 (340 °C, 30 cc/kg DH, 1200/2 ppm Li/B)
- ✓ (PWSCC 생성시간) CR < AW < **30Y** < **15Y** ↔ (작용 응력) CR > AW > **15Y** > **30Y**
- 작용응력만을 고려한 stress-power model의 한계 → 미세조직/기계적강도 특성 추가 고려



관찰된 U-bend PWSCC 생성 및 성장 예시



PWSCC initiation 시험결과

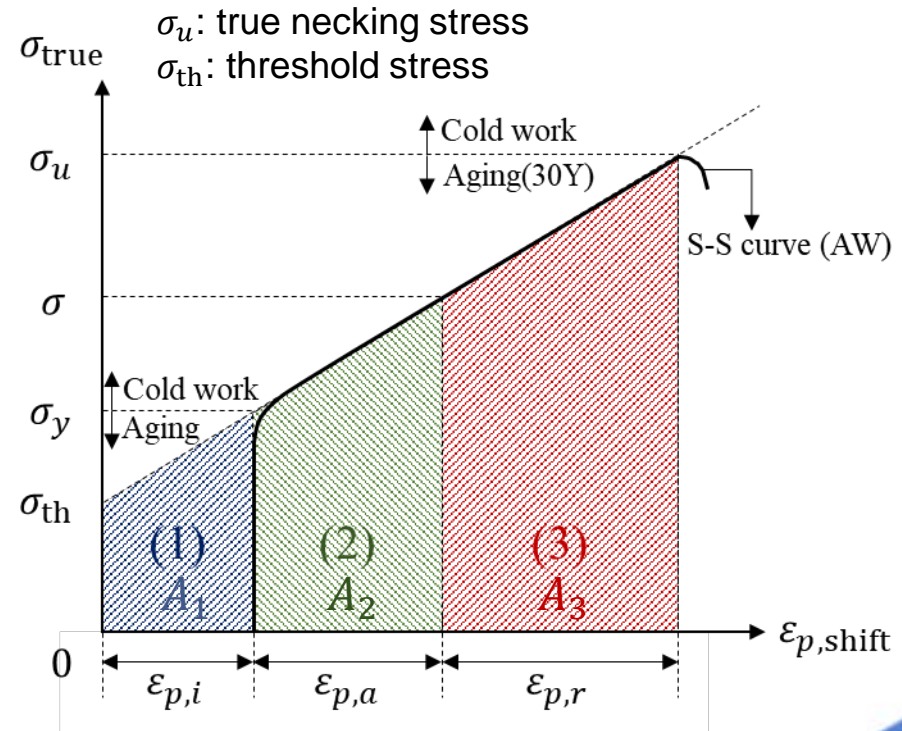
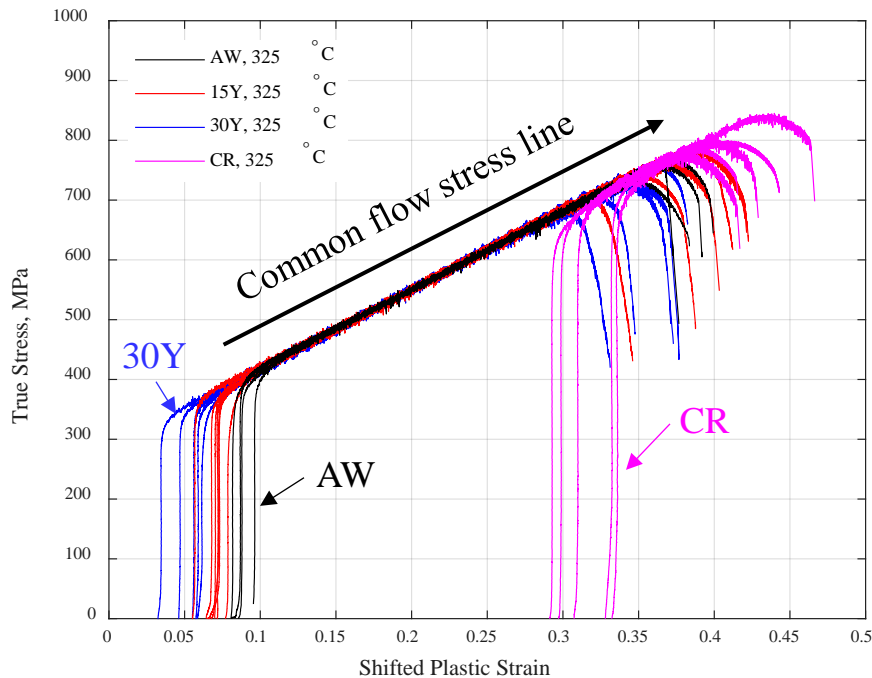
# PWSCC Initiation Time 모델 개발

## 열적시효/냉간가공 효과를 고려한 PWSCC initiation 모델

- ✓ 후보 1: Garud model, 182 용접재에 대한 parameter 추정 필요
- ✓ 후보 2: 소성에너지에 기반한 새로운 모델, **Plastic Energy Ratio** (PER,  $r_{PE}$ )

Stress-power model:  
 $t_i \propto \sigma^{-n}$

$$r_{PE} = \frac{\text{내부변형으로 사용된 소성에너지}}{\text{전체 소성에너지}} = \frac{A_1 + A_2}{A_1 + A_2 + A_3} \cong \frac{\sigma^2 - \sigma_{th}^2}{\sigma_u^2 - \sigma_{th}^2} \longrightarrow \text{PER-Power model: } t_i \propto (r_{PE})^{-m}$$



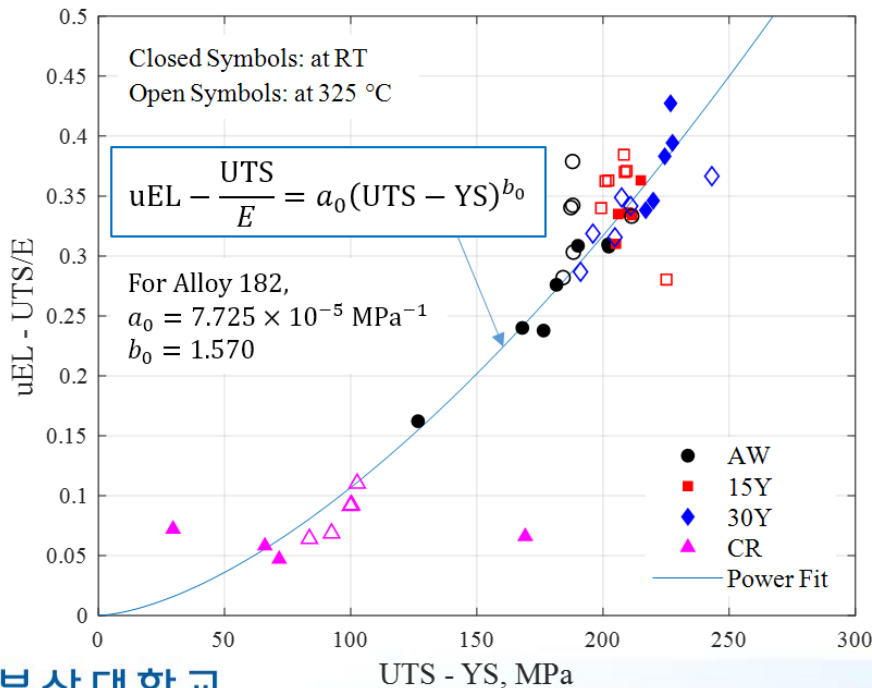
# PWSCC Initiation Time 모델 개발

## PER-Power Model

✓ PER을 계산하기 위해서는 2가지가 필요

- True necking stress ( $\sigma_u$ ) → 인장시험결과를 통해 추정
- Threshold stress ( $\sigma_{th}$ ) → PWSCC initiation 데이터로부터 추정

✓ True necking stress ( $\sigma_u$ )에 대한 추정 →  $\sigma_u = f(YS_{ET}, UTS_{ET}, E_{ET})$



$$\sigma_u = UTS_{ET}(1 + uEL_{ET})$$

$$uEL_{ET} = a_0(UTS_{ET} - YS_{ET})^{b_0} + \frac{UTS_{ET}}{E_{ET}}$$



Alloy 182의 경우,  
 $a_0 = 7.725 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$   
 $b_0 = 1.570$

# PWSCC Initiation Time 모델 개발

## ■ PWSCC Initiation Data

- ✓ 본 연구에서 수행된 U-bend 시험결과 외에 선행연구문헌 결과 포함
  - Alloy 182, Constant stress loading, YS 및 UTS가 알려진 결과만 취합

Data Reference	YS [MPa]		UTS [MPa]		PWSCC Testing Temperature [°C]	PWSCC Specimen	Number of Data
Couvant [3]	RT 350 °C	386 347	RT 350 °C	627 568	325–360	Tensile	6 PWSCC 9 No PWSCC
Scott [4]	RT 350 °C	363 321.7	RT 350 °C	637 549.3	330–360	Pressurized Capsule	8 PWSCC 6 No PWSCC
Vaillant [5-7]	RT 350 °C	395 353	RT 350 °C	657 584*	325	Tensile (Polished)	10 PWSCC 30 No PWSCC
						Tensile (Lathed)	18 PWSCC 8 No PWSCC

[3] T. Couvant, F. Vaillant, Initiation of PWSCC of weld Alloy 182, in: Proceedings of the 15th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems—Water Reactors, Springer, 2011: pp. 1141–1154.

[4] P. Scott, M. Foucault, B. Brugier, J. Hickling, A. McIlree, Examination of stress corrosion cracks in Alloy 182 weld metal after exposure to PWR primary water, in: Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System—Water Reactors—Edited by TR Allen, PJ King, and L. Nelson TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2005: pp. 497–509.

[5] F. Vaillant, J.-M. Boursier, T. Couvant, C. Amzallag, J. Champredonde, Influence of a cyclic loading on the initiation and propagation of PWSCC in weld metal 182, in: 12th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Snowbird, UA, 2005: pp. 14–18.

[6] G. Troyer, S. Fyftch, K. Schmitt, G. White, C. Harrington, Dissimilar metal weld PWSCC initiation model refinement for xLPR part I: a survey of alloy 82/182/132 crack initiation literature, in: Proceedings of the 17th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems—Water Reactors, Ottawa, ON, Canada, 2015: pp. 9–13.

[7] F. Vaillant, J.-M. Boursier, C. Amzallag, C. Bibollet, S. Pons, Environmental behaviour and weldability of Ni-base weld metals in PWRs, Revue Générale Nucléaire. (2007) 62–71.

# PWSCC Initiation Time 모델 개발

## ■ PWSCC Initiation Data (계속)

- ✓ NO PWSCC 데이터(즉, right-censored data)를 어떻게 다룰 것인가?
  - 선행연구에서는 보통 무시됨, 하지만 확률론적인 접근방법을 사용하면 고려 가능
  - Weibull 분포 + Garud/PER-Power model 결합

### ※ Weibull 분포:

$$F(t; \beta, \eta) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]$$

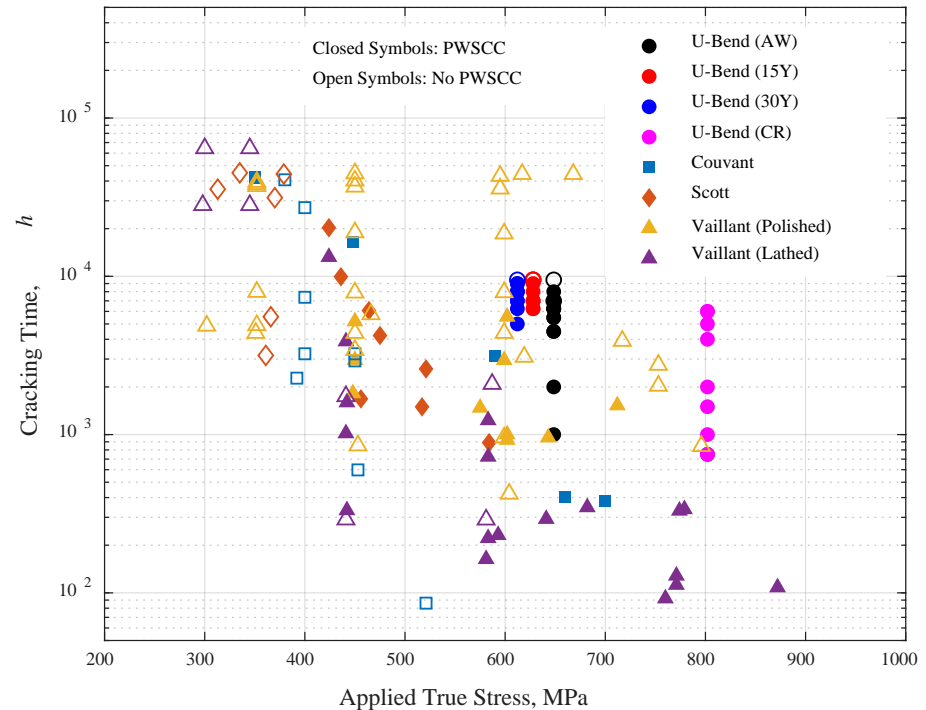
→ Garud model:

$$\eta = \lambda \ln(A) \frac{\ln \left( \frac{A - z}{\frac{\sigma}{Y_{SRT}} - z} \right)}{\ln \left( \frac{A - z}{1 - z} \right)} \frac{1}{m^q}$$

→ PER-power model:

$$\eta = \lambda (r_{PE})^{-m}$$

$\beta$ : shape parameter  
 $\eta$ : scale parameter



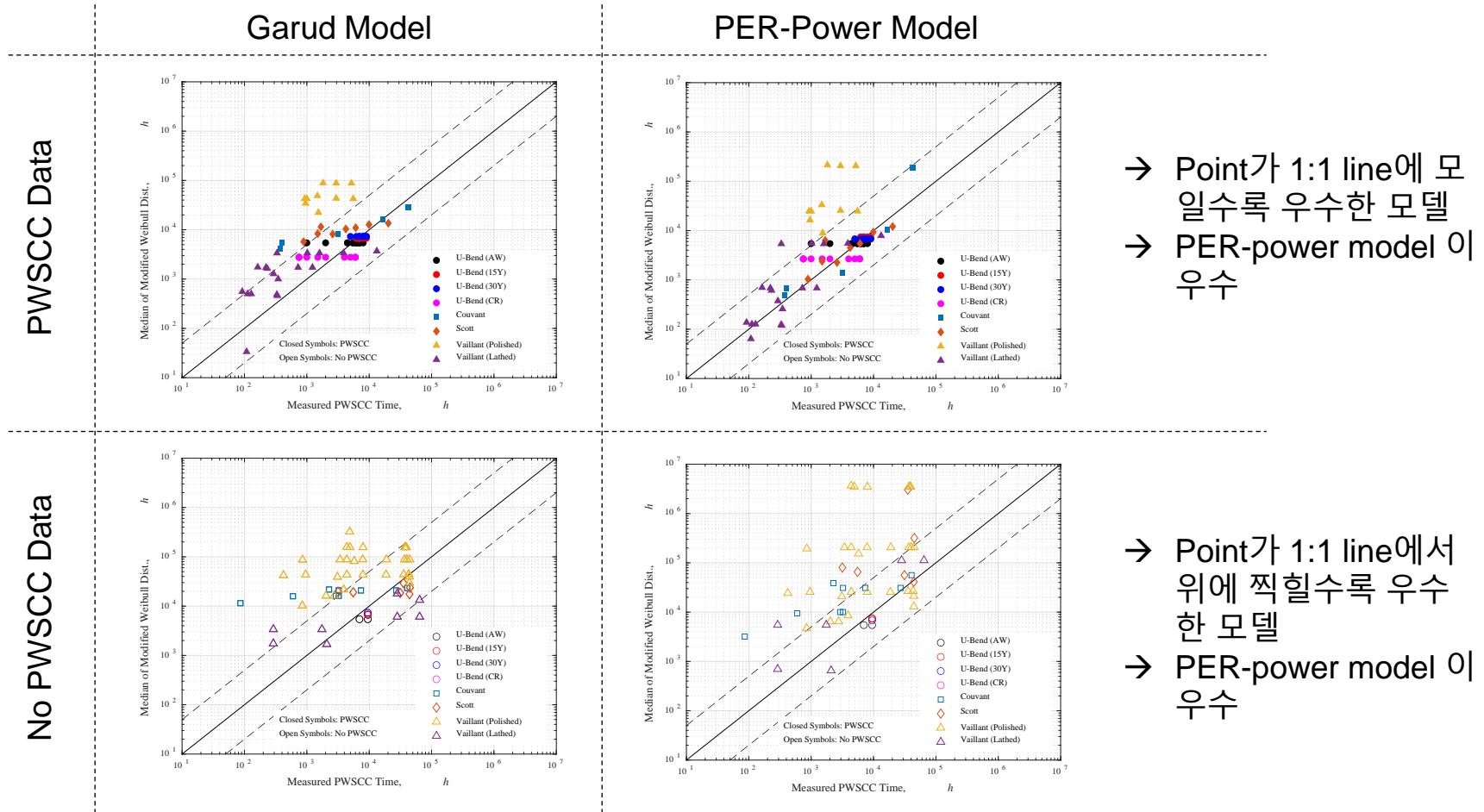
PWSCC initiation data (U-bend + 선행연구)

# PWSCC Initiation Time 모델 개발

## ■ 모델 추정 결과

✓ Parameter 추정방법: Maximum Likelihood Estimation (MLE) 방법

PER-Power model의 likelihood가  $2.21 \times 10^{14}$  배 더 높음



→ Point가 1:1 line에 모일수록 우수한 모델  
→ PER-power model 이 우수

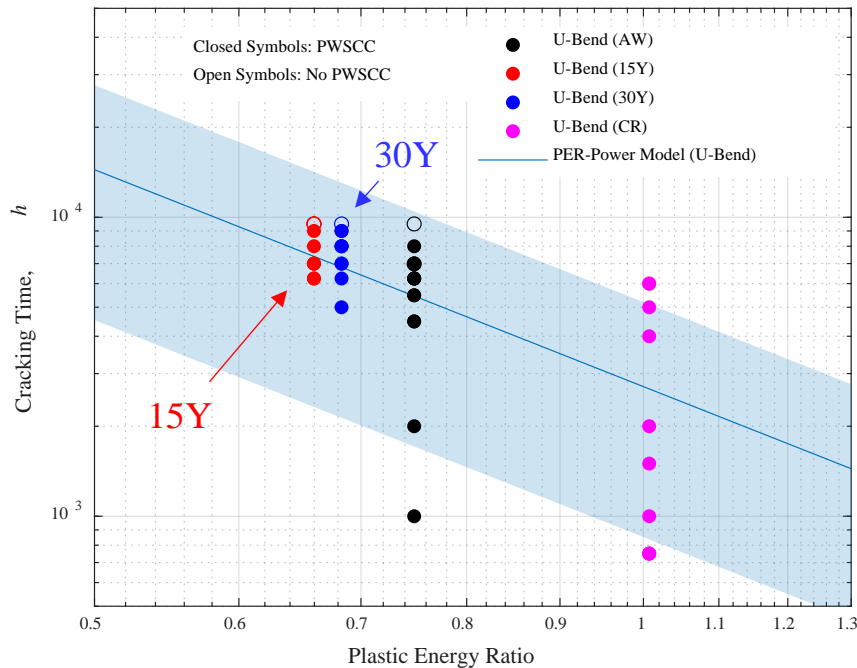
→ Point가 1:1 line에서 위에 찍힐수록 우수한 모델  
→ PER-power model 이 우수

→ PER-power model이 Garud model에 비해 적은 parameter(4개 vs. 11개)를 사용함에도 더 우수

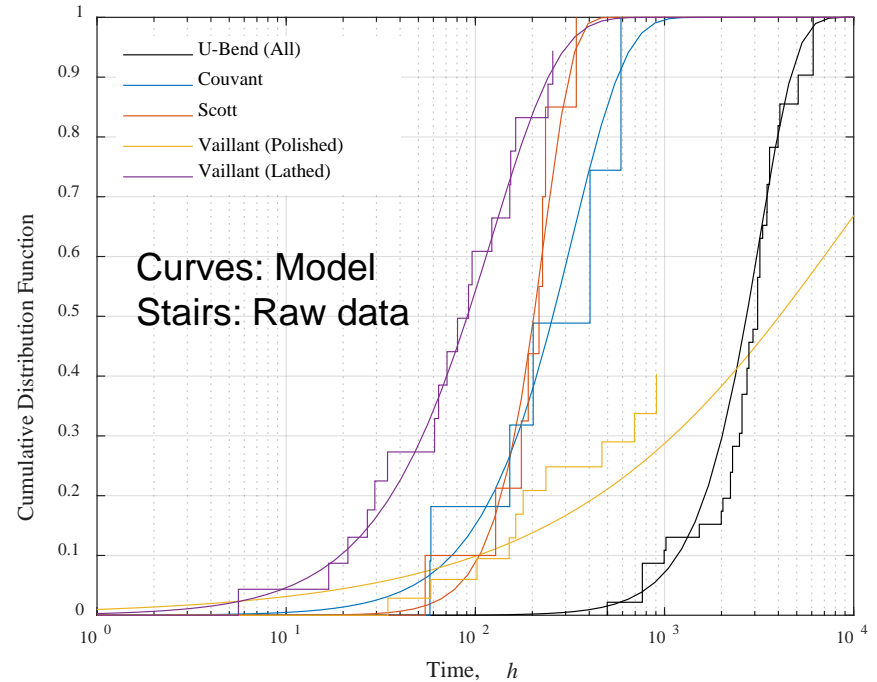
# PWSCC Initiation Time 모델 개발

## ■ 모델 추정 결과 (계속)

- ✓ PER-power model은 열적시효 시간에 따른 PWSCC 저항성 변화도 효과적으로 예측함
  - Stress-Power model에서 발생한 모순(15Y vs. 30Y)을 극복
- ✓ 또한 모델링에 사용된 PWSCC raw data (empirical CDF) 와도 잘 일치하였음



PER에 따른 PWSCC initiation time



Cumulative Distribution Function (CDF) 비교



# 결론 및 요약

## ■ 결론 및 요약

### ✓ 열적시효/냉간가공이 182 용접재에 미치는 영향 실험

#### • 열적시효 효과:

- 결정립계 Cr carbide 성장, 기존 용접 잔류변형 감소
- (325 °C 에서) 강도감소, 연신율 감소(30Y), PWSCC 저항성 증가(15Y) 후 감소(30Y)

#### • 냉간가공 효과:

- 결정립계 국부 잔류변형 증가
- 강도증가, 연신율 감소, PWSCC 저항성 감소

### ✓ 열적시효/냉간가공 효과를 고려할 수 있는 PWSCC initiation 모델 개발

- (182 용접재에 대한) Garud model parameter 추정
- 소성에너지에 기반한 새로운 모델 (PER-Power model) 제시
  - PER-power model이 Garud model에 비해 적은 parameter를 사용함에도 더 우수한 결과

# THANK YOU FOR YOUR ATTENTION & FOR MORE INFORMATION...



Nuclear Engineering and Technology

Available online 10 December 2020

In Press, Journal Pre-proof [?](#)



Original Article

## Nuclear Engineering and Technology Development of Probabilistic Primary Water Stress Corrosion Cracking Initiation Model for Alloy 182 Welds Considering Thermal Aging and Cold Work Effects

Jae Phil Park <sup>a</sup>, Seung Chang Yoo <sup>b</sup>, Ji Hyun Kim <sup>b</sup>  , Chi Bum Bahn <sup>a</sup>  