

## 초저온 액화질소 저장탱크 오스트나이트계 스테인리스강의 용접부의 파괴인성 연구

김영득<sup>1</sup> · 최동준<sup>2</sup> · 박형욱<sup>3</sup> · 조종래<sup>†</sup> · 배원병<sup>4</sup>

(원고접수일 : 2011년 8월 1일, 원고수정일 : 2011년 9월 1일, 심사완료일 : 2011년 9월 2일)

### A Study on the Weld Part Fracture Toughness of Austenite Type Stainless Steel for Cryogenic Liquid Nitrogen Storage Tank

Young-Deuk Kim<sup>1</sup> · Dong-Jun Choi<sup>2</sup> · Hyung-Wook Park<sup>2</sup> · Jong-Rae Cho<sup>†</sup> · Won-Byoung Bae<sup>4</sup>

**요 약 :** 극저온 온도 구조 재료의 중요한 기계적 성질 중 하나는 파괴 인성이다. 파괴 인성 시험 방법의 규격화에 대한 연구는 극저온 구조 요소의 개발과 함께 매우 중요한 문제가 되고 있다. 특히 용접부의 경우 극저온 환경 하에서 사용할 때 불안정파괴를 유발할 수 있기 때문에 용접부의 각 미세조직에 따른 기계적 성질 평가가 중요하다. 본 연구에서는 STS-316L 모재와 용접재를 대상으로 액체질소(77K), 액체헬륨(4K), 293K 온도에서 제하컴플라이언스법과 예민화 열처리한 소형화된 시험편 대상으로 파괴인성평가 실험을 수행하였다.

**주제어 :** 파괴인성, 극저온, 용접, 불안정파괴, 미세조직

**Abstract:** One of the important mechanical properties of cryogenic temperature structure material is fracture toughness. Research on normalization of fracture toughness test method is becoming very important issue with development of cryogenic structural elements. Specially, mechanical properties estimation by each micro-structure of welding department is important because it can cause unstable fracture when use under cryogenic environment in case of welding department. In this study, fracture toughness estimation test was carried out to unloading compliance method and sensitization heat-tread minimized test specimen at liquid nitrogen (77K), liquid helium (4K), 293K temperature to STS-316L base metal and weld metal.

**Key words:** Fracture toughness, Cryogenic temperature, Weld, Unstable fracture, Micro-structure

### 1. 서 론

극저온 구조재료에서 중요한 기계적 성질중의 하나는 파괴인성으로 파괴인성 시험법의 규격화에 관한 연구가 극저온 구조부재의 개발과 함께 매우 중요한 관점으로 되고 있다.

극저온용 구조재료로 오스트나이트계 스테인리스강은 조성과 가공 방법에 따라 기계적 특성도 다

르게 되는데, 그 중 가장 큰 문제 중의 하나는 열시효저하(thermal aging degradation)로 모재와 용접 금속이 고온에서 장시간 동안 가열되면 예민화되어 구조물의 안전성에 큰 영향을 줄 수 있어 파괴인성에 대한 지식이 매우 중요하다[1].

특히 용접부의 경우 극저온 환경하에서 사용할 때 불안정파괴를 유발할 수 있기 때문에 용접부의

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부, E-mail:cjr@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4298)

1 부산중공업(주) 기술연구원

2 부영CST(주)

3 한국해양대학교 대학원 기계공학과

4 부산대학교 기계공학부

각 미세조직에 따른 기계적 전기-화학적 성질 평가가 중요하다[2].

본 연구에서는 용접성이 우수할 뿐만 아니라 용접부의 투자율(magnetic permeability) 상승을 최소화 할 수 있는 재료로 저온에서 인성을 강화시키는 니켈이 함유되어 있는 오스트나이트계 스테인리스강 STS-316L 모재와 GTA 용접과 EB 용접한 용접재가 대상이다. 액체질소(77K), 액체헬륨(4K), 293K 온도에서 제하 컴플라이언스(unloading compliance) 법과 예민화 열처리한 소형화된 시험편 대상으로 파괴인성 실험하여 비교 연구하는게 목적이다.

## 2. 극저온 파괴인성시험

### 2.1 시험장치 및 시험방법

극저온 환경에서 사용되는 재료의 특성은 연성이 좋고 인성이 높기 때문에 탄소성 파괴역학에 근거한 시험방법이 사용된다. 그리고 고가인 헬륨 액체를 다량으로 필요로 하기 때문에 비교적 간단하고 소량의 시험편을 사용한 시험법이 요구된다.

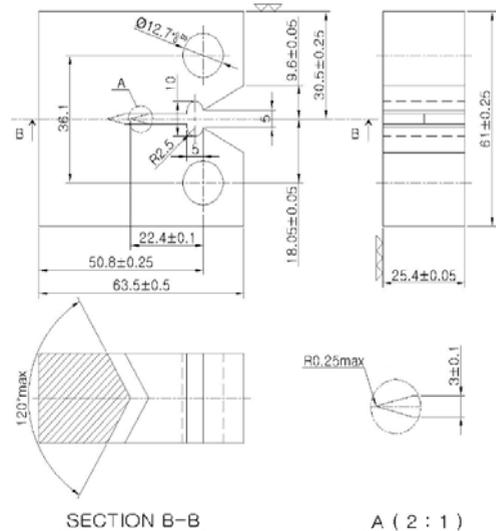
ASTM E813은 극저온 환경에서 파괴인성 평가 방법으로 현재까지 가장 널리 사용되어온 시험법이기에 때문에 본 연구에서도 이 규격에 준한 단일 시험편을 사용하여 시험하였다[3].

파괴인성 시험은 ASTM E813-89에 근거한 단일 시험편법으로 수행하였으며, Table 1은 시험편의 종류 및 시험조건에 따라 제작된 시험편의 수량과 시험편의 일련번호를 나타낸 것이다.

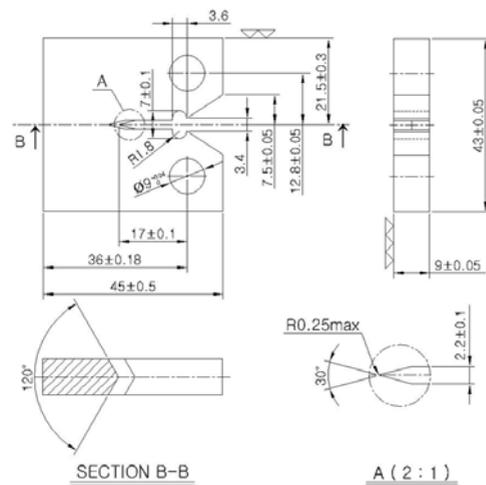
**Table 1:** Number of specimen and test condition

| Standard     | Position    | Temp. (K) | Number of specimen |
|--------------|-------------|-----------|--------------------|
| ASTM E813-89 | Base        | 293       | 3                  |
|              |             | 77        | 3                  |
|              |             | 4         | 3                  |
|              | Weld (GTAW) | 293       | 3                  |
|              |             | 77        | 3                  |
|              |             | 4         | 3                  |
|              | Weld (EBW)  | 293       | 3                  |
|              |             | 77        | 3                  |
|              |             | 4         | 3                  |
| Total        |             |           | 27                 |

온도 293K와 77K에서의 최대하중은 250kN인 Instron 1255를 사용하였고, 온도 4K에서는 100톤 용량의 만능재료시험기를 이용하였으며, 4K 온도를 조성하기 위해 헬륨 저온용기(helium cryostat)를 이용하였다. 시험편의 형상 및 치수를 Figure 1과 Figure 2에 나타냈다. Figure 1은 293K와 77K 시험 온도에 해당하는 시험편이며, Figure 2는 4K 시험 온도에 해당하는 시험편으로 Figure 1은 두께가 25.4mm, 폭 50.8mm이며 Figure 2는 두께가 9mm, 폭 36mm이다.



**Figure 1:** Specimen of 293K and 77K



**Figure 2:** Specimen of 4K

4K 시험편의 경우 두께가 폭의 0.5배로 추천하고 있지만 두께 요구조건을 만족 시킨다면 어떠한 두께도 적용할 수 있다고 제시하고 있다. 균열길이 및  $J$ -적분의 계산,  $J$ - $R$  곡선[4-6],  $J_k$ 의 유효성은 다음 절과 같은 절차를 적용하였다.

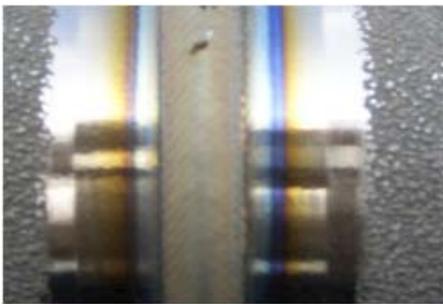
GTAW 용접의 경우 폭이 300mm이고, 길이가 각각 700mm와 1000mm의 압연판을 사용하여 최종 그루브각이 약 4° 정도로 매우 협소한 그루브 용접을 시행하였다. 이러한 용접은 그루브각이 넓은 수동 용접에 비해 용접량이 적기 때문에 용접속도가 빠르고 용접 열영향을 적게 받는 장점을 가지고 있다. 용접전류는 80~150A이며 전압은 10~15V 이내로 하였고 용접 층간 온도를 150°C 이하로 유지하였으며, 총 27회 걸쳐 용접이 실시되었다.

EBW 용접의 경우는 진공용기 및 용접 전용장비를 사용하였으며 230mA의 빔 전류와 60kV의 가속전압을 적용하였다. 또한 용접속도를 최소 200mm/min으로 빠르게하여 한번에 용접되게 하였다.

Figure 3는 GTAW 용접 및 EBW 용접에 의한 판재의 사진을 나타낸 것이다[8].



(a) GTAW



(b) EBW

Figure 3: Photos of weldment (a)GTAW, (b)EBW

### 2.2 균열선단의 응력과 변형

균열이 존재하는 부재에 외력이 작용하면 균열 선단에 응력집중이 발생한다. 균열선단에 있어 응력은 균열선단으로부터 거리의 1/2승에 역비례하며, 단축응력에 비례하고, 균열 길이 반의 1/2승에 비례한다. 이것은 다음 식 (1)로 나타내어진다.

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \sum_{n=-1}^{\infty} A_n \left(\sqrt{\frac{r}{a}}\right)^n f_{ij,n}(\theta) \quad (1)$$

위 식 (1)을 변형하면 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{pmatrix} 1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ 1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)\cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (2)로부터 균열선단의 응력장을 특성화하는 변수(parameter)인 응력확대계수를 다음과 같이 식 (3)으로 얻을 수 있다.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

### 2.3 $J$ -적분의 정의

파괴인성 값은 극저온 구조물의 건전성에 큰 영향을 주는 요소로서, 임계 평면변형 응력확대 계수인  $K_{Ic}$ ,  $J$ -적분의 임계값인  $J_k$  등이 제안되고 있다. Rice는 평면응력 상태 하에서의 크랙선단의 응력장을 해석하기 위해 다음과 같은  $J$ -적분 식을 제안하였다.

$$J \equiv \int_r (W dy - \vec{T} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (4)$$

식 (4)에서  $\Gamma$ 는 균열선단 주위의 반시계 방향인 임의의 적분경로이며,  $W$ 는 변형에너지 밀도함수(strain energy density function)이고,  $ds$ 는 곡선상의 미소요소를 의미한다. 또한  $T$ 는 곡선상에 작용하는 켈적벡터(traction vector)이며,  $u$ 는 변위벡터이고,  $x, y$ 는 균열선단에 수직인 좌표값이다.

$J$ -적분 값은 임의 한계 내에서 탄소성 에너지 해방을으로써, 단위길이 당 포텐셜에너지의 변화율을 나타내는 물리적 의미를 가지며, 다음과 식 (5)와

같이 나타낸다.

$$J = - \frac{dU}{da} \tag{5}$$

만약 탄성 체중의 균열면적이 증가한다면 다음 식 (6)과 같이 표시된다.

$$U = \int_A W dx dy - \int_S T \cdot U dS \tag{6}$$

여기서 포텐셜 에너지  $U$ 는 면적  $A$ 와 경계  $S$ 의 물체에 대해서 표현되며,  $S$ 는 응력의 경계에 해당하는 부분이고,  $T$ 는 표면의 미소요소  $dS$ 에 작용하는 분포력의 벡터이다.

### 2.4 하중제하 컴플라이언스 방법

하중제하 컴플라이언스 방법(unloading compliance method)에 의해 계산되는  $J-R$  곡선상의 둔화직선은 다음 식 (7)로 주어져 있다[7].

$$\begin{aligned} J &= 2\sigma_y \Delta a \\ \sigma_y &= (\sigma_{ys} + \sigma_{UTS})/2 \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)에서  $\sigma_u$ 는 유동응력을 의미하고  $\sigma_{ys}$ ,  $\sigma_{UTS}$ 는 각각 0.2% 항복강도와 최대인장강도를 의미한다. 그리고, 그래프상의 0.15~1.5mm 사이에 위치한 점들을 대수곡선으로 회귀하여 얻는다. 또한, 시험편 두께  $B_N$  또는 리거먼트(ligament) 길이인  $b$ 에 대해서는 다음 식 (8)과 같은 조건이 부여된다.

$$B_N b > 25(J_Q/\sigma_y) \tag{8}$$

여기서  $J_Q$ 는 둔화곡선과 0.2mm 읍셋 선과의 교점으로부터 얻어지는  $J$ 적분 값,  $b$ 는  $b = W_{-a0}$ 이다. 식 (8)를 만족하지 않으면  $J_Q = J_{IC}$ (각 재료의 탄소성 파괴 인성치)로 되지 않는다.

$J-R$  곡선상의 점에 대해서는 식 (9)와 같은 조건이 부여된다.

$$B_N b > 15(J/\sigma_y) \tag{9}$$

$J_Q$ 가  $J_k$ 로 되기 위해서는 위 식을 만족하는 점이 최소한 4점 이상이 존재해야하며, 하중제하 컴플라이언스 방법에 의해 계산된 균열 길이와 파면

에 의해 실측된 균열길이 차이가 15% 이내로 있어야 한다.

## 3. 모재 및 용접재의 파괴인성

### 3.1 파괴인성의 온도 의존성

Figure 4는 파괴인성 시험 결과를 온도변화에 따라 나타낸 것이다. 온도가 감소함에 따라 모든 시험편에서의 파괴인성은 선형적으로 변화하고 있음을 알 수 있고, 파괴인성과 온도는 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} J_Q(Base) &= 3.32(Temp.) + 134 \\ J_Q(GTAW) &= 2.59(Temp.) + 256 \\ J_Q(EBW) &= 2.90(Temp.) + 127 \end{aligned} \tag{10}$$

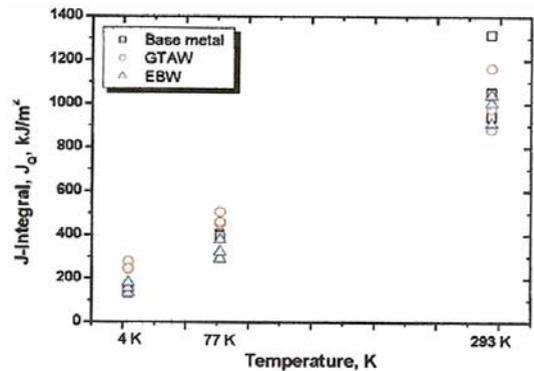


Figure 4: Temperature dependent fracture toughness test results

식 (10)의 기울기는 온도 의존성의 정도를 나타내며, 모재와 EB 용접재보다는 GTA 용접재의 파괴인성이 온도 감소에 덜 의존하고 있다.

### 3.2 강도와 파괴인성의 관계

Figure 5는 유효 항복강도와 파괴인성의 상관관계를 나타낸 것이다. 여기서 모재와 EB 용접재는 마르텐사이트 변태로부터 항복 이후에 변형률 경화를 경험하기 때문에 항복강도 대신 인장강도와 의 평균인 유효항복 강도를 사용하였다.

온도 감소에 따라 유효항복 강도는 증가하나 파괴인성은 감소하는 반비례 관계를 보이고 있다. 또

한 GTA 용접재는 77K 및 4K에서 모재 및 EB 용접재보다 낮은 유효항복강도와 높은 파괴인성을 나타내고 있다.

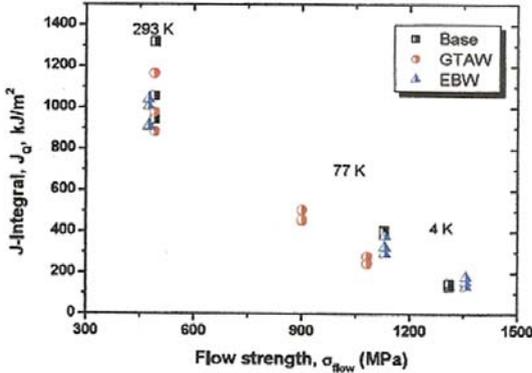


Figure 5: The relationship between strength and fracture toughness test results

이것은 GTA 용접재의 화학적조성에 의해 안정한 오스테나이트 조직을 갖기 때문에 극저온에서조차도 마르텐사이트 변태가 발생하지 않기 때문이다. 또한 파괴인성 증가요소인 니켈이 14wt.% 이상으로 많이 함유되어 있기 때문이다. 일반적으로 극저온에서 강도의 큰 변화 없이 파괴인성을 증가시키는 화학성분이 니켈이며, 표준화 된 316LN 스테인리스강에는 니켈의 허용 범위가 10~14wt.%이다.

3.3 모재와 용접재의 상호 비교

Figure 6에서 Figure 8까지는 293K, 77K, 4K의 온도에서 모재, GTA, EB 용접재에 대한 균열 저항곡선을 나타낸 것이다.

Figure 6는 293K 온도조건으로 모재가 다소 높은 균열저항을 가지고 있고, 가장 작은 항복강도와 가장 높은 연신율을 나타냄으로서 상온에서 가장 우수한 파괴인성을 나타낸다고 할 수 있다.

Figure 7과 Figure 8은 각각 77K와 4K 온도조건으로 293K와 다르게 GTA 용접재의 균열저항이 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한 모재와 EB 용접재와는 서로 유사한 저항곡선과 파괴인성을 나타냈다.

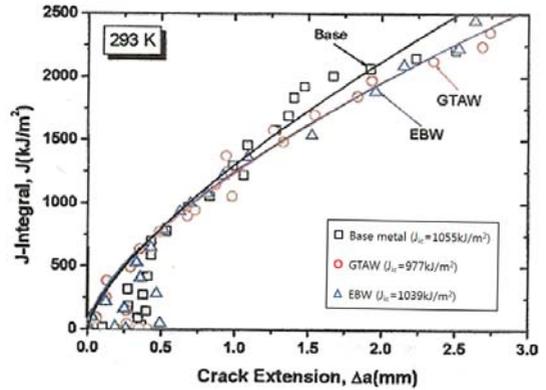


Figure 6: Crack resistance curve at 293K

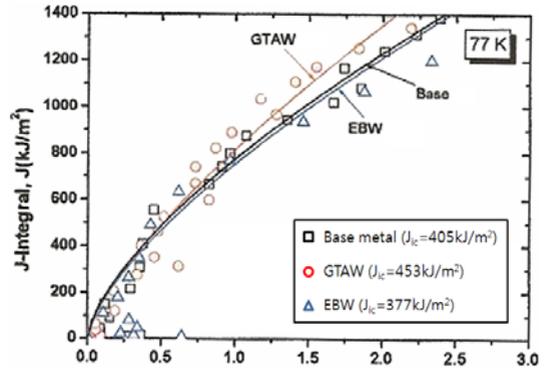


Figure 7: Crack resistance curve at 77K

저온으로 내려감에 따라 GTA 용접재가 높은 파괴인성을 나타내는 것은 경도분포, 화학적 조성, 마르텐사이트 변태에 의한 변형을 경화와 연관시킬 수 있다.

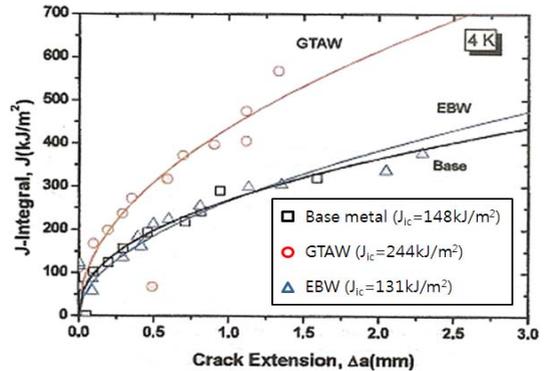


Figure 8: Crack resistance curve at 4K

여기서 마르텐사이트 변태의 측면에서 볼 때, 오스테나이트는 온도가 감소함에 따라 좀 더 안정한 조직인 체심입방정의  $\alpha'$  마르텐사이트로 변태되기 쉽고 인장과 같은 변형에 의해 변태는 더욱 증가되며 오스테나이트에 비해 체적이 크고 취성이기 때문에 스테인리스강과 같은 준 안정한 재료에 대하여 저온에서 소성 변형에 의한 변형을 경화를 유발시킨다.

따라서 변태에 의해 인장강도는 증가하며 결국 파괴인성은 감소하게 되는데 GTA 용접제만은 모든 온도에서 변형을 경화를 일으키지 않는데 이것은 안정한 오스테나이트 조직을 갖기 때문이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 STS-316LN 모재와 용접재를 대상으로 액체질소(77K), 액체헬륨(4K), 293K 온도에서 제하컴플라이언스법과 예민화 열처리한 소형화된 시험편 대상으로 파괴인성평가 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 온도가 감소함에 따라 모든 시험편에서의 파괴인성은 선형적으로 변화하고 있음을 알 수 있었으며, 모재와 EB 용접재보다는 GTA 용접제의 파괴인성이 온도 감소에 덜 의존하고 있음을 확인했다.

2) 293K 온도조건에서 모재가 다소 높은 균열저항을 가지고 있었으며, 가장 작은 항복강도와 가장 높은 연신율을 나타냄으로서 상온에서 가장 우수한 파괴인성을 나타냈다.

3) 77K와 4K의 온도조건에서는 293K와 다르게 GTA 용접제의 균열저항이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 저온으로 내려감에 따라 GTA 용접제가 높은 파괴인성을 나타내는 것으로 경도분포, 화학적 조성, 마르텐사이트 변태에 의한 변형을 경화와 연관시킬 수 있었다.

1)~3)까지의 결론을 종합해보면, GTA 용접제는 모든 온도에서 변형을 경화를 일으키지 않아 모재와 EB 용접재보다 저온 파괴인성이 우수함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 2011년도(2차년도) 기업부설연구소

설치지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### 참고문헌

- [1] 정병호, 김무길, “316 스테인리스강의 입계부식에 미치는 열사이클과 응력의 영향”, 한국마린엔지니어링학회지, 제30권, 제6호, pp. 709-715, 2006.
- [2] 문경만, 이규환, 김진경, “GTAW에 의한 스테인리스강 용접부위의 부식특성에 관한 전기화학적 평가”, 한국마린엔지니어링학회지, 제34권, 제5호, pp. 678-685, 2010.
- [3] ASTM Standard E813-89, “Standard Test Method for  $J_{IC}$ , A Measure of Fracture Toughness”, 1989.
- [4] H. A. Ernst, P. C. Paris, M. Rossow, and J. W. Hutchinson, “Analysis of load-displacement relationship to determine  $J-R$  curve and tearing instability material properties”, Fracture Mechanics, ASTM STP 677, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 581-599, 1979.
- [5] J. A. Kapp, “ $J-R$  curve determination using precracked charpy specimens and the load-drop method for crack measurements”, Defense Technical Information Center, p. 29, 1985.
- [6] J. D. Landes, Z. Zhou, K. Lee, and R. Herrera, “Normalization method for developing  $J-R$  curves with the LMN function,” Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, vol. 19, no. 4, pp. 305-311, 1991.
- [7] 권일현, 정세희, “극저온 구조재료의 파괴인성평가법에 관한 연구”, 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제1호, pp. 64-72, 1998.
- [8] 최동준, 박형욱, 조종래, “초저온 액화질소 저장용기의 오스테나이트계 스테인리스강의 기계적 특성 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제35권, 제4호, pp. 451-459, 2011.

## 저 자 소 개



### 김영득(金榮得)

1992년 금오공과대학교 기계공학과(공학사), 1994년 금오공과대학교 기계설계공학과(공학석사), 2008년 부산대학교 정밀기계공학과(박사과정), 현재 (주)두산중공업 기술연구원 책임연구원



### 최동준(崔東俊)

1979년 동의대학교 기계설계과(공학사), 2006년 한국해양대학교 기계공학과(공학석사), 2009년 한국해양대학교 기계공학과(공학박사), 현재 부영CST(주) 대표



### 박형욱(朴炯燾)

2004년 동아대학교 기계공학과 (공학사), 2006년 동아대학교 기계공학과(공학석사), 2006년 - 2008년 (주)넥센타이어 기술연구소, 2008년 한국조선기자재연구원 에너지해양연구본부, 2008년 - 현재 한국해양대학교 기계공학과(박사과정)



### 조종래(趙琮來)

1982년 부산대학교 기계공학과 (공학사), 1984년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사), 1993년 한국과학기술원 정밀공학과(공학박사), 1984년 - 1995년 한국중공업 기술연구소, 1999년 Post-Doc.(영국-Birmingham Univ.) 1995년 - 현재 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부(교수).



### 배원병(裵載閔)

1976년 성균관대학교 기계공학과 (공학사), 1978년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사), 1992년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사), 1979~현재 부산대학교 기계공학부(교수),