

## 고강도 구조용강의 저온 충격특성 평가

김재훈\* · 김덕희\* · 김후식\* · 조성석\*\* · 전병완\*\*\* · 심인옥\*\*\*

### Evaluation of Impact Characteristics for High Strength Structural Steel at Low Temperature

J. H. Kim\* · D. H. Kim\* · H. S. Kim\* · S. S. Cho \*\* · B. H. Jeon\*\*\* · I. O. Shim\*\*\*

#### ABSTRACT

Impact tests are performed on the high strength structural steel that is being developed for the submarine material. Especially, the impact characteristics of this structural steels at low temperatures are investigated by charpy impact testing. Hyperbolic tangent curve fitting method is used to evaluate the LSE(lower shelf energy), USE(upper shelf energy) and DBTT(ductile-brittle transition temperature). Proportional equations between charpy impact energy and lateral expansion are obtained using the test results. Effect of temperature on the fracture appearance is investigated by using SEM.

#### 초 록

잠수함용 재료로 개발된 고강도 구조용강의 충격 시험이 수행되었다. 특히 샤르피 충격시험기를 이용하여 저온에서 구조용 강의 충격특성을 평가하였다. 최소흡수에너지, 최대흡수에너지, 연성 취성 전이온도를 결정하기 위하여 hyperbolic tangent curve fitting법을 이용하였다. 시험결과로부터 샤르피 충격에너지와 횡팽창량 사이의 비례 관계식을 산출하였다. 시험온도 변화에 따른 파단면 특성을 평가하기 위하여 SEM을 이용하여 파단면을 관찰하였다.

#### 1. 서 론

고성능 및 고기능성을 갖는 무기체계 개발을 위해서는 사용 강재의 고강도-고인성은 필수적이다. 현재 세계적으로 건조중인 잠수함에는 항복강도 689MPa 이상급의 강재가 요구되므로,

항복강도 689MPa급의 DS100강과 896MPa 정도의 DS130강이 적용되고 있다. 이들 강재는 모재와 용접 열 영향부(heat affected zone; HAZ)의 물성이 우수하여 강판 자체로는 문제가 없으나, 다량의 탄소 및 합금원소 함유로 인하여 용접 시 입열량에 제한이 가해지고 저온균열 방지를

\* 충남대학교 기계설계공학과 (Chungnam National University, Dept. of Mechanical Design Engineering)

\*\* 충남대학교 금속공학과 (Chungnam National University, Dept. of Metallurgical Engineering)

\*\*\* 국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

위해 용접시공 조건이 엄격해지는 문제가 있어 이에 대한 개선이 요구되어 왔다. 이러한 관점에서 용접성이 획기적으로 개선되어 인장강도 490MPa급의 강재에 적용되는 용접조건으로도 용접이 가능한 심해용 고장력강의 개발의 일환으로써, DS100강과 동일한 강도와 인성 수준을 나타내며, 용접시 예열 생략이 가능한 Cu를 가하여 합금 설계된 PFS강의 개발이 시작되었다.

PFS강의 주 용도인 잠수함의 사용환경은 평균 35,000ppm 정도의 NaCl 농도를 갖는 해수이고, 수온도 위도에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 극지방에서의 해수표면 온도는 -2℃인 반면 태평양 및 인도양의 적도부근은 연평균 수온이 29℃ 정도로 최대 32℃까지 올라간다. 극지방을 제외한 대부분의 지역은 수심이 증가할수록 수온은 감소하기 때문에 잠수함의 사용환경에서의 온도범위는 -34℃에서 49℃ 정도의 온도 구간이다. 또한 잠수함은 운항 깊이에서 공격을 받기도 하고 파도와 같은 동적 하중도 받게 되므로 잠수함용 재료는 온도의 변화 및 동적 하중에 대하여도 우수한 특성을 요구한다[1,2].

따라서 본 연구에서는 용접 구조용 저합금강인 PFS강의 저온충격특성을 시험하여 현장 적용성을 평가하였다. 특히 PFS강을 실제 무기체계에 적용 시 석출경화를 얻기 위하여 450℃~650℃ 범위에서 템퍼링 되므로, 소재를 450℃, 550℃, 650℃로 템퍼링 열처리하여 이에 따른 저온 충격 특성을 평가하였다. 설계에 적용시 중요한 인자가 되는 연성 취성전이온도(DBTT)를 평가하기 위하여 hyperbolic tangent fitting 방법을 이용하였으며, 이 방법을 횡팽창량과의 관계에까지 확대 적용하였다. 또한 횡팽창량과 흡수에너지와의 상관 관계식을 유도하였다.

## 2. 시험 방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에서 사용된 재료는 잠수함용 소재로 개발되는 PFS강이다. 여기서 PFS는 개발된 소재의 이름이다. Table 1에 재료의 화학적 조성을

나타내었다. Table 1과 같은 화학적 조성의 Cu를 함유한 고강도저합금강(HSLA)은 일정한 템퍼링 온도에서 석출경화가 발생한다. 따라서 실제 재료를 무기체계에 적용하기 위해서는, Cu의 석출경화가 발생되리라 예측되는 450℃~650℃ 온도구간에서 소재를 템퍼링 한 후 재료의 거동을 평가하여야 한다[3].

본 시험에 사용된 재료는 100톤 전로를 이용하여 제강한 후 보조 정련 과정을 거쳐 연속주조에 의해 220mm slab로 제조되었다. 제조된 slab의 표면에 존재하는 산화층을 scarfing 공정에 의해 제거한 후 1150℃에서 재가열처리 및 sizing 압연, scarfing 공정을 거쳐 25mm의 판재로 제조하였다. 압연강은 900℃에서 용체화 처리 후 급냉시킨 뒤, 450℃, 550℃, 650℃에서 1시간씩 템퍼링한 후 공냉시켰다. Table 2는 각각의 온도에서 템퍼링 열처리 한 후 인장시험을 통하여 얻은 기계적 특성값이다. 시험편은 세가지 템퍼링 온도와 LT, TL의 두가지 채취 방향의 총 6가지 종류로, ASTM E 23[4]에 따라, Fig. 1과 같은 크기 및 형상으로 가공하였다.

Table 1 Chemical compositions of PFS steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb
0.054	0.202	0.5	0.006	1.32	3.48	0.58	0.48	0.036

Table 2 Mechanical properties for PFS steel tempered at various temperatures

Temper temperature (°C)	Young's modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
450	218.57	942.65	981.26	13.08
550	242.51	858.14	895.51	14.06
650	241.50	814.91	858.47	14.00



Fig. 1 Shape and dimensions of Charpy impact specimen

2.2 시험 방법

시험 온도는 완전한 형태의 온도-충격흡수에너지( $E_{CVN}$ ) 선도를 얻기 위하여 90°C, 60°C, 40°C, R.T, 0, -10°C, -18°C, -20°C, -40°C, -51°C, -60°C, -80°C, -85°C, -100°C, -120°C, -140°C, -150°C, -196°C의 온도로 시험 평가하였다.

충격시험에 사용한 시험기는 Satec사의 샬피 충격시험기(Charpy impact tester)이다. 시험편에 대한 앤빌의 지지점 간격은 20mm이고, 턱의 충격면 폭은 2mm이다. 400.6J의 용량으로 충격을 가하였으며, 타격속도는 5.18m/sec이다.

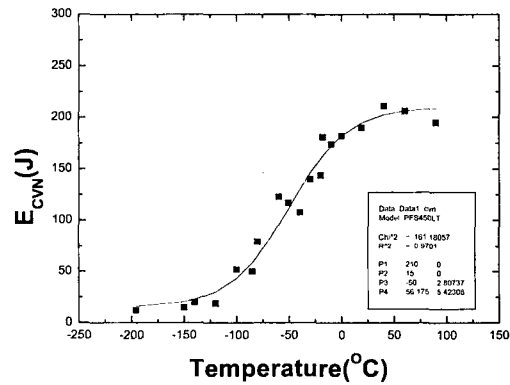
시험온도를 조절하기 위해 사용된 항온조(bath)는 고온용과 저온용으로 구분하여 사용하였다. 고온용 항온조는 내장된 전열체를 이용하여 시험온도를 조절하였다. 항온조에 넣은 열유지매체로서 상온 이상에서는 물(상온 ~ 98°C)을 사용하였고, 상온 이하에서는 알코올(상온 ~ -60°C) 또는 아이소펜탄(-60°C ~ -160°C)을 사용하였다. -196°C 온도 분위기는 액체질소를 이용하였다. 저온용 항온조는 액체질소를 주입하여 일정한 시험온도를 유지하도록 조절하였다. 시험은 ASTM 규격[4]에 준하여, 일정 시험온도에서 5분 이상 유지시키고, 항온조에서 꺼내어 충격 완료까지 5초 이내에 실시하였다. 시험편의 횡팽창량은 규격에 의해 제작한 측정기를 사용하여 측정하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

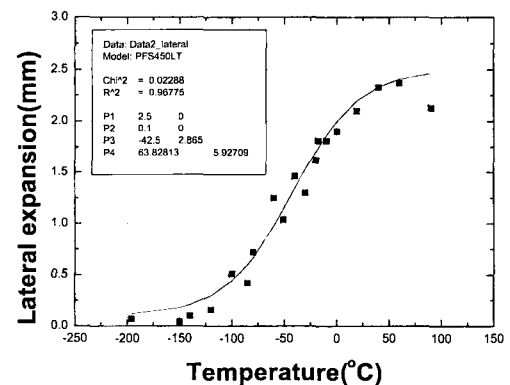
3.1 템퍼링 온도 변화에 따른 충격 특성

Fig. 2에 450°C에서 템퍼링한 LT 방향 PFS강의 온도 변화에 따른 전형적인 온도-샤르피 충

격흡수에너지( $E_{CVN}$ ) 선도 및 온도-횡팽창량 선도를 보여주고 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 온도- $E_{CVN}$  선도 혹은 온도-횡팽창량 선도의 데이터는 S자 형태로 분산되어 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 오차가 있는 충격시험결과의 해석을 간단하게 하고, 인위적인 오차를 줄이며 흡수에너지와 시험온도와의 천이곡선(transition curve)을 결정하기 위하여 본 논문은 hyperbolic tangent(tanh) curve fitting 방법을 이용하였다.



(a) Temperature- $E_{CVN}$  data



(b) Temperature-lateral expansion data

Fig. 2 Charpy V-notch impact transition curve for 450°C tempered PFS steel with LT direction

Hyperbolic tangent curve fitting 방법은 온도 변화에 따른 충격인성 데이터가 Fig. 3과 같은 형태로 분포한다고 가정하여, 시험데이터를 식 (1)과 같이 근사화 한다.

$$E_{CVN} = A + B \tanh[(T - T_0)/C] \quad (1)$$

여기서,  $E_{CVN}$ 은 흡수에너지,  $T$ 는 시험온도,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $T_0$ 는 회귀곡선(regression analysis)에 의하여 결정되는 상수이다. 이들 상수의 물리적 의미는 Fig. 3과 비교하여 생각하면, 다음과 같이 정리할 수 있다.

- A-B : 최소 흡수에너지(lower shelf energy, LSE)
- A+B : 최대 흡수에너지(upper shelf energy, USE)
- $T_0$  : 연성 취성 전이온도(ductile-brittle transition temperature, DBTT)
- B/C :  $T_0$ 에서의 기울기

Fig. 2의 곡선은 식(1)을 이용하여 구한 결과이다. 식(1)의 방법으로 구한 템퍼링 온도 변화에 따른 PFS강의 hyperbolic tan식은 Table 3과 같다. 또한 이 식을 이용하여 구한 최대 흡수에너지(USE), 최소 흡수 에너지(LSE), 연성 취성 전이온도(DBTT)는 Table 4와 같다.

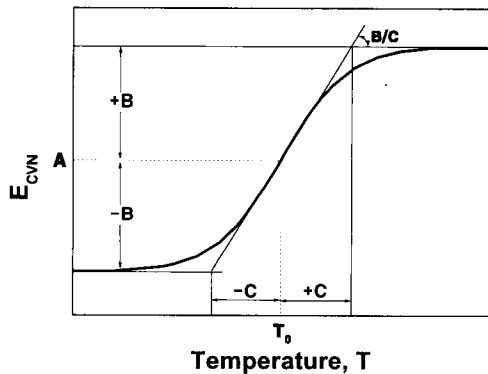


Fig. 3 Interpretation of the coefficients of the tanh equation

Table 3 Hyperbolic tangent equations for PFS steel tempered at various temperatures

Equation	
1) 450 - LT	$E_{CVN} = 112.25 + 97.75 \tanh[(T + 50)/56.18]$
2) 450 - TL	$E_{CVN} = 102.5 + 92.5 \tanh[(T + 45.63)/57.97]$
3) 550 - LT	$E_{CVN} = 150 + 130 \tanh[(T + 111.09)/38.97]$
4) 550 - TL	$E_{CVN} = 127.5 + 122.5 \tanh[(T + 122.09)/52.37]$
5) 650 - LT	$E_{CVN} = 145 + 135 \tanh[(T + 155.26)/43.11]$
6) 650 - TL	$E_{CVN} = 140 + 120 \tanh[(T + 140.41)/50.36]$

Table 4 Results of charpy impact test for PFS steel tempered at various temperatures

Temper temperature (°C)	Direction	USE (J)	LSE (J)	DBTT (°C)
450	LT	210	15	-50.00
	TL	195	10	-45.63
550	LT	280	20	-111.09
	TL	250	5	-122.09
650	LT	280	10	-155.25
	TL	260	20	-140.41

Fig. 4는 템퍼링 온도 변화에 따른 PFS강의 온도- $E_{CVN}$  선도를 나타내고 있다. 또한 Fig. 5는 온도-횡팽창량 선도를 보여주고 있다. Fig. 4의 온도- $E_{CVN}$  선도 및 Fig. 5의 온도-횡팽창량 선도

는 식 (1)과 같은 hyperbolic tanh.식을 근거로 시험 데이터를 재 도시 한 결과이다. 온도-횡팽창량 선도는 온도- $E_{CVN}$  선도와 동일한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한, 온도-횡팽창량 선도를 통하여 예측할 수 있는 DBTT 온도 구간 역시 온도- $E_{CVN}$  선도에서 계산된 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4에서 템퍼링 온도가 다른 PFS강 공히 LT 방향의 USE(upper shelf energy)가 TL 방향에 비하여 높게 나타나고 있다. DBTT가 생기는 온도 범위는 650℃에서 템퍼링한 PFS강의 경우 -140℃~-150℃ 범위에 존재하고, 550℃에서 템퍼링한 PFS강의 경우 -110℃~-120℃ 범위에 존재하나, 450℃에서 템퍼링한 PFS강은 -50℃ 근방으로 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 -84℃에서 시험한 결과를 보면, 450℃에서 템퍼링한 PFS강의  $E_{CVN}$ 은 미 해군 규격인 81.3J에 미달했으나, 다른 강들은 월등히 높은 값을 나타냈다. 반면, -18℃에서 시험한 결과를 보면, 모든 강에서 미 해군 규격인 108.5J 보다 월등히 커서 잠수함등 해상 무기 체계에 적용이 가능 할 것으로 판단된다[7]. PFS강의  $E_{CVN}$ 값은 일반 구조용 강에 비하여 매우 우수한 충격 특성을 갖는 것을 알 수 있다[8]. Fig. 6은 항복 강도와 인성의 최적 balance를 찾기 위하여 -18℃ 및 -84℃에서 템퍼링 온도의 함수로 인성이 낮은 LT 방향의 샤르피 충격흡수에너지( $E_{CVN}$ )값을 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 인성과 항복 강도의 최적 balance는 650℃에서 템퍼링한 강으로 판단된다. 이상의 결과에서 템퍼링 온도 변화에 따른 PFS강의 충격 특성을 살펴보면, 650℃에서 템퍼링한 PFS강의 경우가 우수한 것을 볼 수 있다. 450℃에서 템퍼링한 PFS강과 달리 550℃와 650℃에서 템퍼링한 PFS강의 경우, 취성파괴는 물론 연성에 대한 저항성이 현저하게 개선되는 양상을 보였다. 이런 현상은 Cu 석출물의 조대화, lath 구조의 회복과 부분적인 재결정 그리고 매우 안정하고 새롭게 형성된 austenite때문으로 해석할 수 있다[9]. 또한 새로운 austenite가 유해한 결정립계 불순물에 대한

sink로 작용하여 입계파괴를 감소시키기 때문에 인성이 증가한다[10]. 또 다른 원인으로는 martensite 기지로부터 편석에 의해 탄소가 축적되어 새로운 austenite를 형성시키기 때문에 인성이 증가한다는 연구결과도 있다[11]. 이러한 복합적인 원인으로 인하여 템퍼링 온도가 증가함에 따라 인성이 비약적으로 향상되었으며, 650℃에서 템퍼링한 PFS강의 경우 -84℃에서 240J 이상의 높은 값을 나타내었다.

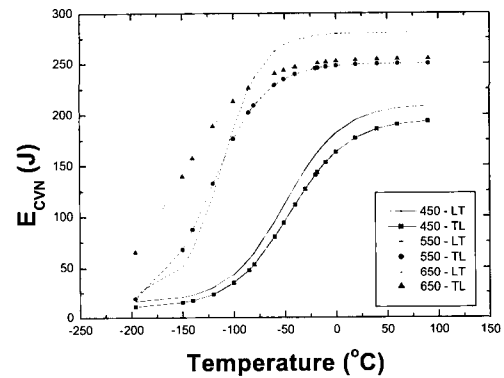


Fig. 4 Charpy V-notch impact transition curves by using charpy impact absorbed energy of PFS steel tempered at various temperatures

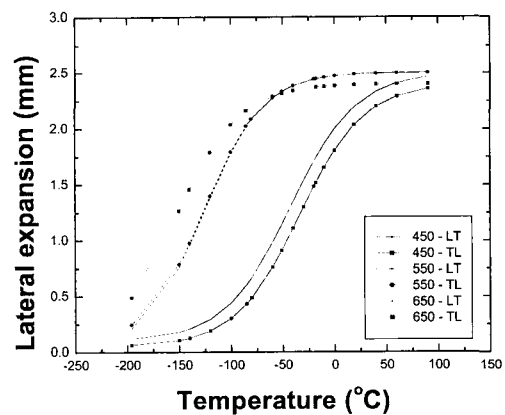


Fig. 5 Charpy V-notch impact transition curves by using lateral expansion of PFS steel tempered at various temperatures

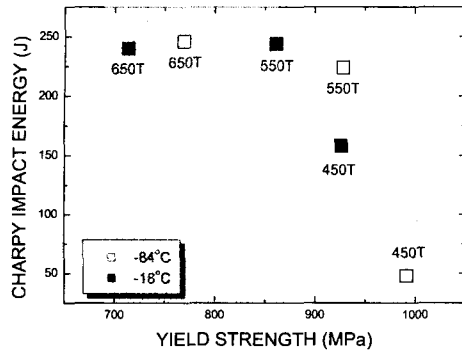


Fig. 6 Vector diagram showing the combination of strength and toughness as affected by the tempering temperature at  $-84^{\circ}\text{C}$  and  $-18^{\circ}\text{C}$  in LT direction

또한 모든 재료의 DBTT 온도는 잠수함의 사용온도의 최저 온도 구간 이하에 존재하고 있는 것을 알 수 있다.

### 3.2 흡수에너지와 횡팽창량의 관계

Fig. 4는 시험 온도에 따른 온도- $E_{CVN}$  곡선으로, Fig. 5의 온도-횡팽창량 곡선과 유사한 형태를 보이고 있다. 따라서 충격시험에서 얻은 충격흡수에너지는 횡팽창량과 연관성을 갖고 있음을 알 수 있다. Mujahid등[9]은, 충격시험편 notch부(인장)의 횡수축량과 notch 반대 끝 부분(압축)에서의 횡팽창량을 인성의 표준으로 측정하고, 이와 같은 수축과 균열선단개구변위(CTOD) 간의 비례관계가 존재한다고 보고하였다. 또한, 횡팽창량은 재료의 소성변형량을 나타내며, 흡수에너지는 소성변형량의 크기에 따라 증가되므로, 상호간에 비례관계가 성립한다고 알려져 있다.

Fig. 7은 횡팽창량과 Charpy 충격인성의 관계로, 상호간에 비례 관계가 있음을 보여주고 있다. 이와 같은 선형적 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$L.E. = 107.76(CVN) - 2.26 \quad (2)$$

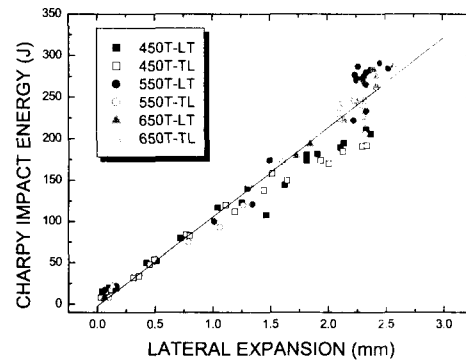


Fig. 7 Relation between lateral expansion and Charpy impact energy for PFS steel tempered at various temperatures

### 3.3 파단면 특성

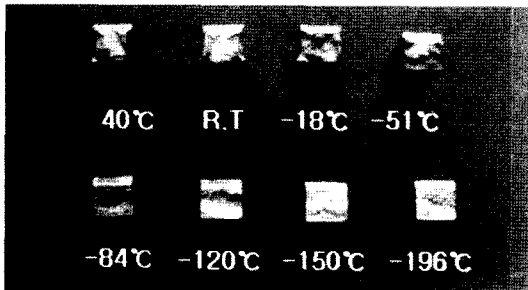
Fig. 8은  $450^{\circ}\text{C}$  및  $550^{\circ}\text{C}$ 에서 템퍼링한 PFS강에 대해 충격 시험 후 파단면을 근접 촬영한 결과이다.  $450^{\circ}\text{C}$ 에서 템퍼링한 LT 방향 PFS강의 경우, DBTT 온도 근처인  $-51^{\circ}\text{C}$ 까지는 적은 양의 벽개 파면(cleavage fracture)이 존재하지만, plastic hinge, 그리고 양면에 shear lip 등이 많이 관찰되어, 파단이 취성파면 보다는 연성파면으로 진행되었음을 알 수 있다. 그러나  $-51^{\circ}\text{C}$ 이하의 DBTT 온도 이하인 경우 cleavage의 분포가 커지고 shear lip의 적어지는 취성파면의 특성을 보이고 있다. 그러나 동일한 온도에서 템퍼링하였지만 TL 방향의 PFS강의 경우, DBTT 온도 이하인  $-51^{\circ}\text{C}$ 에서의 파면은 연성이기보다는 취성에 가까운 특성을 보이고 있다.

$550^{\circ}\text{C}$ 에서 템퍼링한 PFS강의 경우,  $-120^{\circ}\text{C}$  이상의 온도 범위에서는 shear lip이 크게 분포한 연성 파면이고, 그 이하의 온도에서 파면은 취성 파면이다. 참고로  $650^{\circ}\text{C}$ 에서 템퍼링한 PFS강의 경우,  $-150^{\circ}\text{C}$ 에서의 충격파면도 웨어릴과 같은 연성 파면을 보이다가,  $-196^{\circ}\text{C}$ 에서는 취성 파면을 보이고 있다[2].

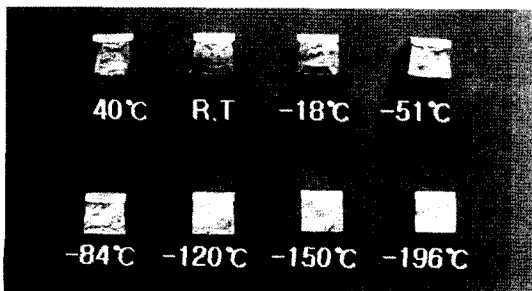
Fig. 8의 두 재료 모두 시험 온도가 연성-취성

천이 온도에 가까울수록, 시험편의 shear lip의 분포는 적어지는 취성 파괴의 특성을 보이고 있으며, 앞에서 구한 연성 취성 천이온도를 파면 특성과 비교하면, 회귀곡선으로 구한 연성취성 천이온도 결과는 잘 평가되었음을 알 수 있다.

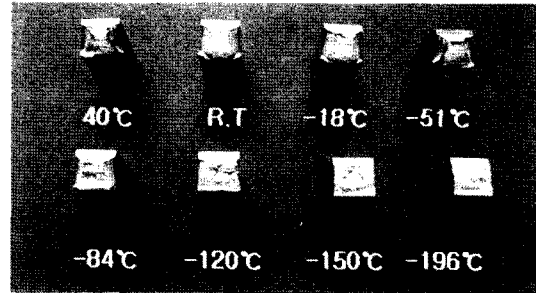
Fig. 9~10은 450℃ 및 650℃에서 템퍼링한 TL 방향의 PFS강을 상온, -196℃ 및 DBTT온도에서 파면을 SEM을 이용하여 관찰한 결과이다. 대부분의 재료에서 상온의 경우 다수의 작고, 움푹 패인 형태의 딴플(dimple) 파면이 관찰되는 연성파괴의 형태를 보이고, -196℃에서는 벽개 파면을 보이는 전형적인 취성파괴를 보이고 있다. 또한 두 재료의 DBTT 온도 구간 근방에서 관찰한 파면은 딴플 및 벽개파면이 같이 관찰되고 있다. DBTT의 온도는 두 재료가 크게 다르지만, 그 파면 모습은 거의 비슷한 형태를 보이고 있다. 이상의 결과들을 통하여 볼 때 시험데이터를 회귀분석 하여 얻은 연성취성천이온도를 기준으로 예측되는 파면 특성은 파단면을 관찰한 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



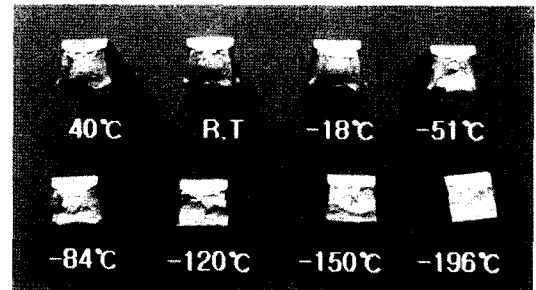
(a) 450℃ tempered PFS steel-LT



(b) 450℃ tempered PFS steel-TL



(c) 550℃ tempered PFS steel-LT



(d) 550℃ tempered PFS steel-TL

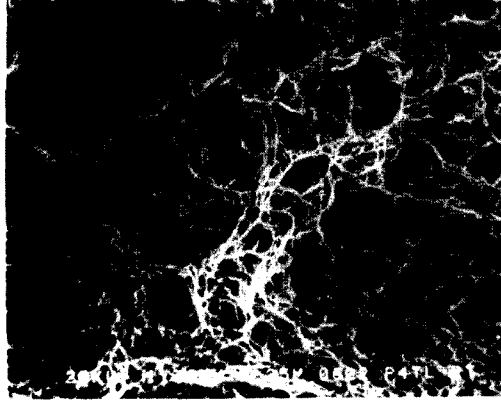
Fig. 8 Fracture appearance of Charpy impact specimen for 450℃ and 550℃ tempered PFS steels

#### 4. 결론

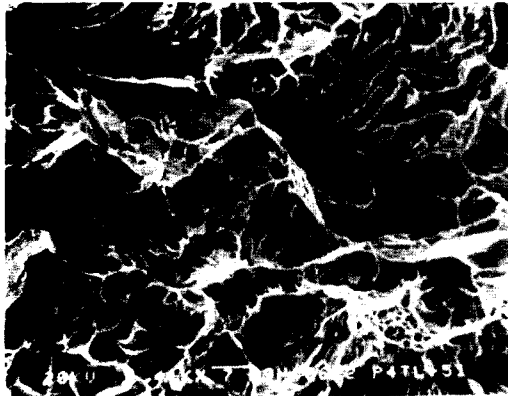
잠수함용 소재로 개발된 용접 구조용 저합금 강인 PFS강의 현장 적용성을 평가하기 위하여 저온 충격시험을 수행하였다.

시험에 사용한 재료는 450℃, 550℃, 650℃의 온도로 템퍼링한 PFS강으로, 충격 하중에 대한 재료의 응답을 평가하였다. 온도 변화에 따른 연성 취성 천이 온도(DBTT, ductile brittle transition temperature), 최대 흡수에너지, 최소흡수에너지 및 재료의 거동을 평가하기 위하여 90℃~-196℃의 온도 범위에서 샬피 충격시험기를 이용하여 시험 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 650℃에서 템퍼링한 PFS강의 충격특성이 우수하다.



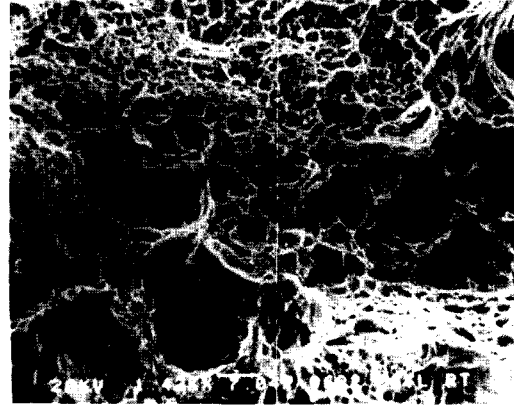
(a) R.T



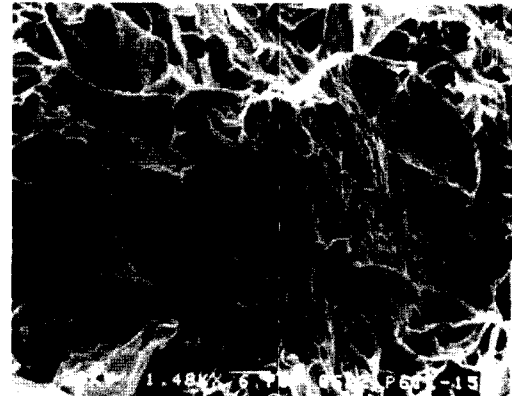
(b) -51°C



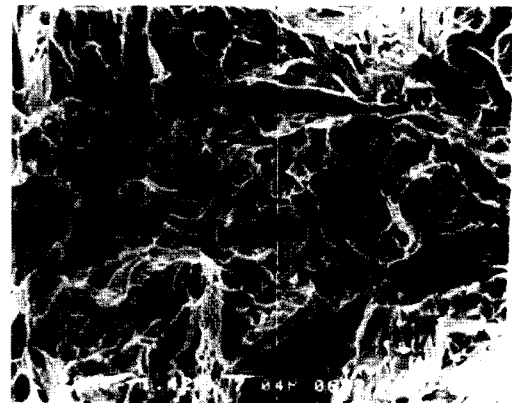
(c) -196°C



(a) R.T



(b) -150°C



(c) -196°C

Fig. 9 Scanning electron micrograph of charpy impact test specimen for 450°C tempered PFS steel with TL direction in the variation of test temperature

Fig. 10 Scanning electron micrograph of charpy impact test specimen for 650°C tempered PFS steel with TL direction in the variation of test temperature



2) 온도-Ecvn 선도를 회귀분석하여 얻은 결과는 온도-횡팽창량 선도와 잘 일치한다. 또한 hyperbolic tangent curve fitting 방법을 통하여 계산한 연성취성전이온도는 이 온도에서의 파면 및 SEM에서 관찰한 결과와 잘 일치하고 있다.

3) 재료의 횡팽창량과 충격 흡수에너지는 선형적인 관계를 갖으며, 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

### 참고 문헌

1. 유장용, 정홍철, 김학이, 노병두, 용접 구조용 저합금 고장력강(PFS강) 1차 시제 판재 특성 평가, 포항제철 기술연구소, 2000.
2. 김재훈, 조성석, 김덕희, 임동규, 김후식, PFS강 기계적 특성 평가(I), 국방과학연구소, TEDC-411-010275, 2001.
3. 박태원, 심인옥, 김영우, 강창윤, "열분석법에 의한 Cu를 함유한 HSLA강의 시효거동에 관한 연구", 대한금속학회지, Vol. 33, No. 1, 1995, pp. 57~64.
4. ASTM, "Standard Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, ASTM E-23, 1994, pp. 277~300.
5. W. Oldfield, "Fitting Curves to Toughness Data", J. Test and Evaluation, Vol. 7, No. 6, 1979, pp. 326~333.
6. 김훈, 김주학, 지세훈, 홍준화, "샬피 충격시험에 있어서 시험편 크기의 영향", 대한기계학회논문집, A, 제21권, 제1호, 1997, pp. 93~103.
7. 전병완, Cu 석출강화형 HSLA-100M강의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 템퍼링 온도의 영향, 충남대학교 대학원 박사학위논문, 2001.
8. J. M. Barsom and S. T. Rolfe, Fracture and Fatigue Control in Structures, Butterworth Heinemann, 1999, pp. 10~14.
9. M. Mujahid, A. K. Lis, C. I. Garcia and A. J. DeArdo, in Proceeding of the International Conference on Processing, Microstructure and Properties of Microalloyed and Other Modern High Strength Low Alloy Steel, Ed. A. J. DeArdo, Iron and Steel Society, 1992, pp. 345~357.
10. J. Kim and J. W. Morris, Jr, Met. Trans., A, Vol. 17, 1986, pp. 243~252.
11. J. Kim and C. Syn and J. W. Morris, Jr, Met. Trans., A, Vol. 14, 1983, pp. 93~103.