

3. 특집기사

극한지 환경에서의 재료거동

Behavior of Materials in Cold Region Environments



김 윤 해

Yun-Hae Kim

• 한국해양대학교
기계소재공학부



엄 수 현

Soo-Hyun Eum

• 한국해양대학교
기계소재공학부



배 창 원

Chang-Won Bae

• 한국해양수산연수원
해양안전교육팀장



Piyush K.

Dutta

• U.S.Army Cold
Regions Research
and Engineering
Laboratory



권 순 철

Soon-Chul Kwon

• U.S.Army Cold
Regions Research
and Engineering
Laboratory

초 록

본 해설에서는 현재 및 앞으로도 그 중요성과 필요성이 점차적으로 강조되고 있는 재료들에 대한 특성들에 대해 해설하고자 하였다. 다양한 형태의 구조물에 사용되고 있으며, 그에 대한 연구와 개발이 끊임 없이 진행되고 있는 각각의 재료들에 대한 저온과 같은 극한 환경 조건에서의 충분한 지식을 터득하고 그러한 재료들에 필요로 하는 특정한 물성에 대한 요구를 충족시키고 광범위하게 적용될 수 있는 시험법 등을 소개하고자 하였다.

1. 머릿말

극지공학(cold regions engineering)은 혹한과 같은 극저온 상태(extreme low temperature)에서 사용되고 있는 재료들을 평가한 분야으로써 그 중요성이 점차로 대두되고 있다. 일반적으로 저온 상태에서 재료들은 더욱 단단해지면서 취성(brittle)의 특성을 보이게 되며, 이로 인해 그와

같은 환경하에서 사용된 재료들의 안전성에 의구심을 불러일으키게 되는 것이다. 비교적 최근에 발생한 하나의 예로서 미국의 우주 왕복선인 챌린저호(challenger)의 폭발사고를 들 수 있다. 이 비극의 직접적인 원인을 밝히기 위해 많은 노력을 기울인 끝에, 사용된 부품의 조그마한 결함 즉 저온상태로 야기된 O-ring seal의 파손으로 인해 이러한 대형 참사가 발생되었다는 사실에 큰 충격

E-mail:yunheak@hanara.kmaritime.ac.kr, T:(051) 410-4355

을 받지 않을 수 없다. 더우기 계속적으로 새롭고 가벼운 특성을 장점으로 가지는 신소재들이 현재의 구조물들에 적용되고 있는 오래되고 무거운 자재들을 빠르게 대체시키고 있다는 것을 상기해야 할 것이다. 이러한 최근의 경향들로 인해 저온환경 하에서 사용되는 재료들의 기계적인 특성들을 평가하고 분류하는 시스템의 도입이 얼마나 시급한 과제인가를 알 수가 있다.

이와 같은 필요성으로 인하여 전세계적으로 -60°C 이하의 저온 환경하에서의 재료 평가 및 시험법에 대한 연구가 활발히 진행이 되고 있는 실정이다. 이러한 재료의 평가 및 시험법은 일반적인 압축-인장 시험(compression-tension test)으로부터 높은 변형률하에 하중을 부하하는 Hopkinson Split-Bar 시험까지 그 수와 방법이 다양해지고 있다. 또한 비파괴 검사 및 파괴 검사, 그리고 파괴역학까지 고려한 시험법들이 계속적으로 적용을 시도하고 있으며, 이러한 경향은 꾸준히 증가할 것이라 사료가 된다.

극저온 환경에서 사용된 재료에 영향을 미칠 수 있는 요인은 그 수나 종류면에서 정확한 파악이 불가능한 것이 현재 진행되고 있는 연구의 한계라고 해도 과언은 아닐 것이다. 극히 낮은 온도 또는 높은 변형률(high strain rate)에 의해 야기되는 취성파괴(brittle fracture)는 순식간에 발

생된 구조물에 치명적인 손상 및 커다란 인명피해를 가져올 수 있다는 것은 잘 알려져 있는 내용이다. 실제적으로 우리는 종종 뉴스 미디어등을 통해서 외부 온도가 극히 낮은 환경($0^{\circ}\text{C} \sim -60^{\circ}\text{C}$)에서 항구에 정박중인 선박의 동체부분이 둘로 갈라져 침몰한 경우라든지, 교량이나 각종의 파이프라인(pipeline), 가스 저장탱크(gas storage tank) 등의 갑작스런 참사의 소식을 접할 수 있었다(Figure 1). 이는 연료로 사용되는 가스나 석유 등의 탐사 및 시추 활동이 주로 외부온도가 극히 낮은 지역의 깊은 지하층에서 이루어지고 있으며, 저장 및 운반 등과 같은 활동 등은 혹독한 해양환경내에서 이루어지고 있기 때문에 이러한 가혹한 조건들에 의한 취성파괴가 빈번하게 발생이 되는 것이다. 그러나 이러한 문제를 해결하기 위한 연구들의 성과는 현재까지 그 위험성만 대두시킬뿐이며, 일반적으로 적용이 가능한 해결방안은 마련하지 못하고 있는 실정임을 우리는 직시해야 한다.

금속재료와는 다르게 복합재료(polymeric composite)가 저온환경에서 더욱 취약한 특성을 가지고 있다는 것은 잘 알려진 내용이다. 이러한 복합재료는 성형방법에 따라서 또는 구조물의 성형에 사용된 재료의 종류 및 특성 등에 따라서 취성 파괴에 이르게 되는 시점 및 손상의 범위등이 결정지어진다. 이와 같은 발생요인과 함께 낮은 온도

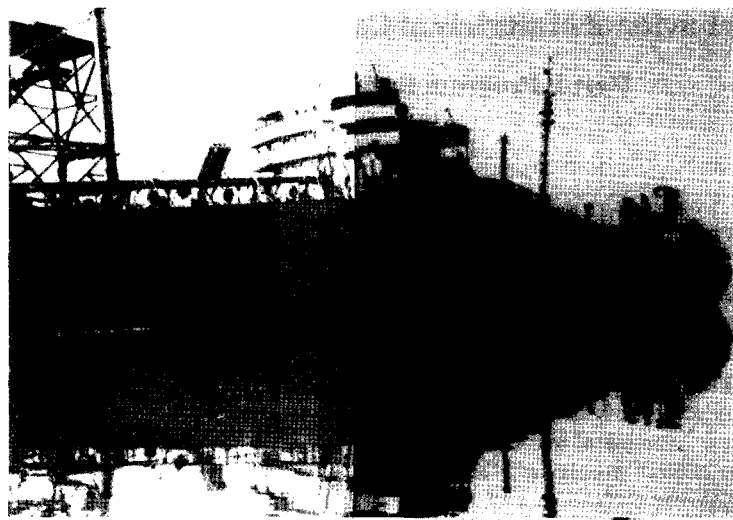


Fig. 1 Photograph of a T-2 tanker that failed at pier.

상태, 재료에 위치한 내부 및 외부 결함, 피로, 그리고 높은 변형률의 하중 등도 복합재료의 취성과 파괴 현상을 촉진시키는 치명적인 요인으로 들 수 있다. 금속재료의 경우에는, 소위 전이온도 (transition temperature)라 불리는 좁은 온도 범위내에서의 미세한 체적감소 (small reduction)로 인하여 파괴강도 (fracture toughness)의 급격한 감소를 야기할 수 있다. 이는 실온상태에서는 이미 재료내부에 잠재되어 있는 결함 등이 구속되어지고, 온도가 점차적으로 낮아짐에 따라 이를 기점으로한 균열이 발생되어 진전하면서 최종적으로 구조물에 단시간의 치명적인 파괴를 야기시키게 되는 것이다.

이렇듯, 각각의 구조물에 사용되고 있는 재료의 기계적 특성치를 좌우할 수 있는 저온의 영향에 대한 기본적인 이해의 필요성에 따라 본 연구에서는 낮은 온도 상태의 재료가 가지는 일반적인 특징들에 대해 언급을 하였으며, 이를 뒷받침할 중요한 기계적 또는 공학적 근거 자료들을 제시하여 저온과 같은 혹독한 사용조건하에서 재료에 요구되어지는 충족할만한 최적조건을 찾고자 노력을 하였다.

2. 극한 환경하에서의 재료 특성

극한 저온 상태에 노출된 대부분의 재료들은 자신을 구성하고 있는 구조물의 기계적 특성치 및 사용기간을 단기간에 혹은 장시간에 걸쳐 감소시키는 역할을 한다. 즉, 사용 온도가 낮아짐에 따라 경도 (hardness), 항복강도 (yield strength) 그리고 탄성계수 (modulus of elasticity)가 증가함을 보이나, 파괴/충격 강도 (fracture toughness/impact strength), 피로강도 (fatigue strength), 포아송비 (poissons ratio) 그리고 열팽창계수 (thermal expansion coefficient)의 감소를 가져오게 되는 것이다.

2.1 금속재료

저온의 상태에서 금속재료가 나타내는 가장 특이한 기계적 성질의 변화는 취성이 증가한다는 것이다. 금속성 물질 또는 구조물의 경우에는 저온상태에서 가할 수 있는 충격과 같은 순간적인 하중에 의해 산산히 부서어지던지 아니면 균열의 발생, 진전에 의한 최종적인 파단이 일어날 수 있다

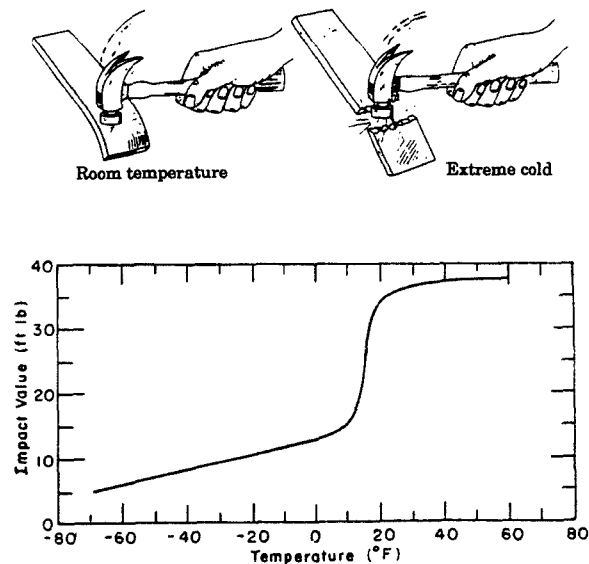


Fig. 2 Impact test results for a steel pipe material.

(Figure 2). 금속재료 중 면심입방정 구조물 (face centered cubic lattice structure)인 니켈 (nickel), 구리 (copper), 알루미늄 (aluminum), 납 (lead) 그리고 은 (silver) 등은 저온 상태에서 연성 (ductility)의 특징을 보인다. 그러나 철 (iron), 크롬 (chromium), 몰리브덴 (molybdenum) 그리고 텅스텐 (tungsten)과 같은 대다수의 체심입방정 (body centered cubic lattice structure) 구조물들은 같은 환경 조건하에서 반대로 연성의 감소를 나타낸다. 이와 같은 연성의 감소율은 Figure 3에서 볼 수 있듯이 저온에서의 응력-변형률 관계에서 찾아볼 수 있다. 온도가 낮아짐에 따라 연성이 시작되는 항복점 (yield point)과 파괴가 일어나는 최대강도점 (ultimate strength point)이 점차로 높은 응력값으로 이동하게 되지만, 최종적인 파단은 그 보다 훨씬 낮은 응력값에서 발생되어진다.

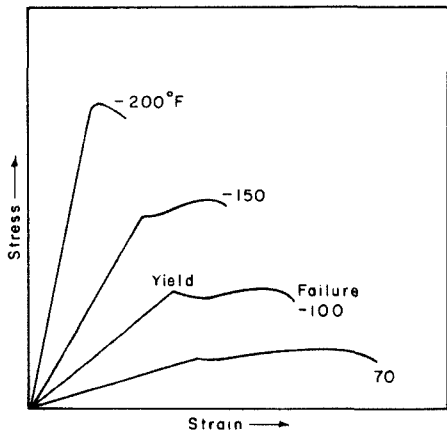


Fig. 3 Typical stress-strain curve of a body centered cubic class metal at decreasing temperature.

Figure 4는 온도에 영향에 따른 면심입방정과 체심입방정의 일반적인 기계적 성질의 한 단면을 보이고 있다. 여기에서 주의하여 보아야 할 것은 낮은 응력하에서 시험편은 탄성적으로 변형을 일으키고 있다는 것이다. 하지만 계속적으로 응력이 증가함으로써 시험편은 영구변형 또는 취성파괴가 발생할 수 있는 소성변형의 영역인 탄성 변형의

한계점까지 도달되는 것이다. Figure 4(1)는 FCC의 경우를 보이고 있는데, 여기서 항복강도는 온도가 감소함에 따라 증가함을 볼 수 있으나 최대강도는 낮은 온도에서 더 큰 증가값을 보임을 알 수 있다. Figure 4(2)는 BCC의 경우로 어떠한 특이적인 소성 변형이 일어나기 전에 시험편의 파단이 발생하는 취성영역을 나타내고 있다. 이러한 취성영역은 다음과 같은 몇 가지의 요인들로 인하여 고온으로까지 확장되어질 수 있다. 열거하면 (1) 날카로운 형상의 균열 또는 응력 집중 (stress concentrator), (2) 높은 변형률, 그리고 (3) 금속내의 높은 탄소 함유와 같은 불순물 (impurities) 등이다.

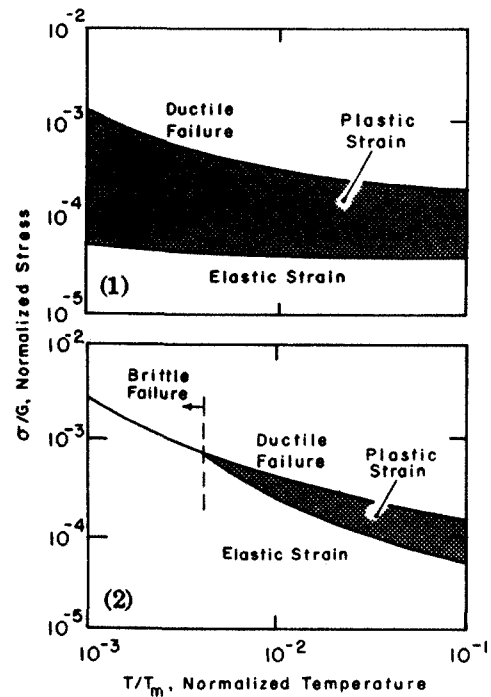
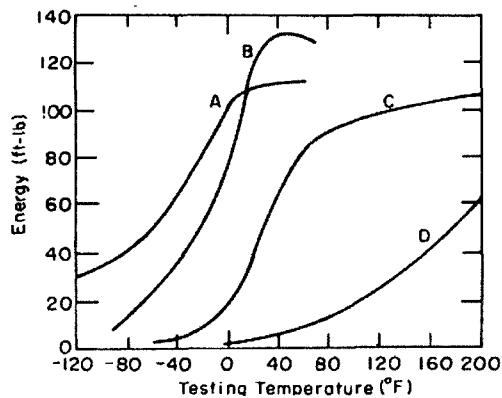


Fig. 4 Simplified deformation behavior maps of (1) FCC material and (2) BCC materials.

재료의 파괴모드 (fracture mode)는 사용온도가 감소함에 따라 재료가 가지는 점성 (viscosity)이 빠르게 증가하기 때문에 연성에서 취성적으로로의 변환이 일어나는 것으로 알려져 있다. 대부분의 금속재료에서 유동응력 (flow

stress)은 온도가 높을수록 낮아진다. 전위 부근의 응력집중은 주로 그 주위에 작용하는 연성변형에 의해 완화되어지고 이로 인해 취성적인 파괴는 발생하지 않는다. 낮은 온도 환경에서는 슬립 현상(slip)을 위한 항복응력이 높기 때문에 미세한 균열(microcrack)에 의해 야기된 변형이 발생되어지고 결과적으로 취성적인 파괴를 보이는 것이다(McClintock and Ali, 1966).



Steel	Composition						
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
A	0.17	0.53	0.25	0.011	0.02	3.39	0.06
B	0.18	0.82	0.15	0.012	0.03	0.04	0.03
C	0.18	0.73	0.07	0.008	0.03	0.05	0.03
D	0.20	0.33	0.01	0.013	0.03	0.15	0.09

Fig. 5 Energy-temperature curves obtained by Charpy V-notch tests of steels.

하지만, 건설재료로서의 규격화된 대부분의 탄소강(carbon steel) 경우, 낮은 온도 환경에서 사용시엔 이러한 확실적인 취성 파괴모드로의 해석은 바람직하지 않다. Figure 5는 각각 다른 화학적 성분을 가지는 철강재료의 Charpy V-notch 시험을 통해 얻은 에너지-온도 곡선을 나타내고 있다. 각각의 곡선들은 파괴모드의 변환이 일어나는 온도를 비교적 정확히 나타내고 있다(McClintock and Ali, 1966). 또한 계속된 철강재료에 관한 연구들로 인해 극히 낮은 온도 환경에서도 사용이 가능한 고강도 및 저합금 금속의 개발이 빠르게 진행되고 있는 실정이다(Baldy 1976).

저온 조건에서의 금속재료들이 보이는 일반적인

기계적 성질은 Appendix A에 요약하였다. 이러한 기계적 성질의 비교를 통해 스테인레스강이 극한(extreme low temperature) 온도에 가장 부합된다는 것을 알 수가 있다. 다른 금속재료들과는 달리 스테인레스강은 저온에서 알루미늄이 가지는 고유의 특성치 감소가 없어 낮은 온도에서의 취성적인 특성은 나타나지 않는다. 따라서 이와 같은 사용환경으로의 적용이 가능한 것이다. 더불어 냉간가공(cold-worked)된 구리 또한 저온 상태에서 연성의 증가를 나타내기 때문에 점차로 그 적용분야가 넓어지고 있다.

2.2 플라스틱/폴리머

플라스틱 재료는 일반적으로 저온상태에서 매우 취성적인 것으로 알려져 있다. 하지만 이는 금속재료와는 다른 양상을 보인다. 즉, 플라스틱의 인장강도는 저온에서 매우 뚜렷한 증가 현상을 나타낸다. 예를 들면, 나일론(nylon) 재료의 인장강도는 21°C에서는 7,400 psi이나 -57°C에선 13,000psi로 증가한다. 하지만 충격강도의 경우엔선 반대로 21°C에선 16 ft-lb이나 -40°C에선 0.9 ft-lb까지 감소함을 보인다(Hansen 1960). 또한 폴리에틸렌(polyethylene), 열가소성 폴리머 등의 인장강도도 -73°C이하에서도 여전히 유지되어진다. 하지만 고무를 원료로 한 타이어, 튜브, 케이블 그리고 호스 등과 같은 재료는 저온에서 고유의 유연함을 잃고 취성적인 파단을 일으킨다. 이러한 탄성의 감소는 경도, 부피 그리고 열팽창계수와 연관이 있다.

일반적으로 시간과 온도가 폴리머의 거동에 큰 영향을 미친다. Figure 6는 단순한 폴리머 재료들의 전형적인 열적-기계적 거동을 나타내고 있다. 저온에서 이러한 재료는 유리와 같은 분자들의 열적 진동의 감소 및 자유공간(free space)의 감소로 인한 수축특성을 보인다. 온도가 올라감에 따라 선 고유의 유연성은 증가하게 된다. 유리전이 온도인 Tg는 일반적으로 -53°C에서 -97°C에서 관찰되어진다(Read 1983). 유리상태의 영역(glassy region)에서의 폴리머는 유기물(organic)인 경우엔 탄성계수가 105에서 106psi, 무기물

(inorganic)인 경우엔 107psi 로 각각 전형적인 특성을 나타낸다. 이 때의 포아송비는 0.25에서 0.4까지 나타나며, 고무영역(rubbery region)에선 탄성계수가 102에서 103psi까지 떨어진다 (McClintock 1966).

폴리머의 응력-하중 특성은 Figure 7에서 보이는 것과 같이, 완충기와 스프링을 포함한 장치로 좀더 쉽게 이해할 수 있다. 주위 온도가 점차로 극히 낮아짐에 따라 이러한 장치의 완충기 부위는 그와 비례적으로 빠르게 열게되어 유동성은 급격히 작아진다. 유리전이온도 부근에 이르면 내부에 담겨진 재료가 점탄성적인 거동을 나타내기 시작하며 (Figure 8), 이러한 점탄성적인 변형이 지속되는 동안, 응력-하중의 관계는 변형률에 크게 의존하게 된다. 높은 변형률은 폴리머로 하여금 소성유동(plastic flow)을 하기에 충분한 만큼의 시간적 여유를 주지 못한다. 즉, 변형률이 높아질수록 재료는 보다 탄성적이며, 보다 단단해진다.

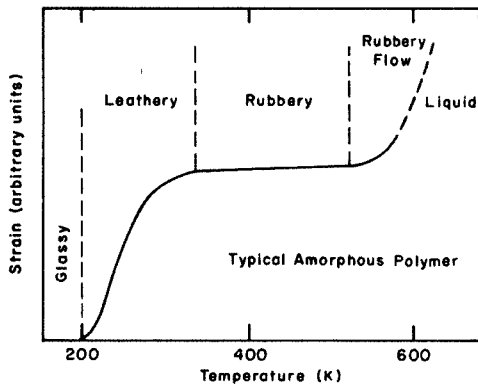


Fig. 6 Thermomechanical curve of a simple polymer.

반대로, 변형률이 낮을수록 반복하중 곡선의 이력현상 (hysteresis)으로 야기된 점성유동과 연관된 영향을 감소시킨다. 또한, Figure 8은 낮은 온도에서 에폭시 수지가 파괴점에 도달하기까지 직선적인 탄성 거동을 나타냄을 보여주고 있다. 그러나 이 영역에선 어떠한 이력현상에 의한 영향이나 변형률에 대한 의존성은 나타나지 않는다 (Hartwing 1979).

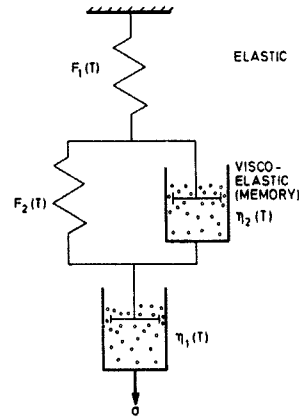


Fig. 7 Schematic presentation of viscoelastic properties of polymers.

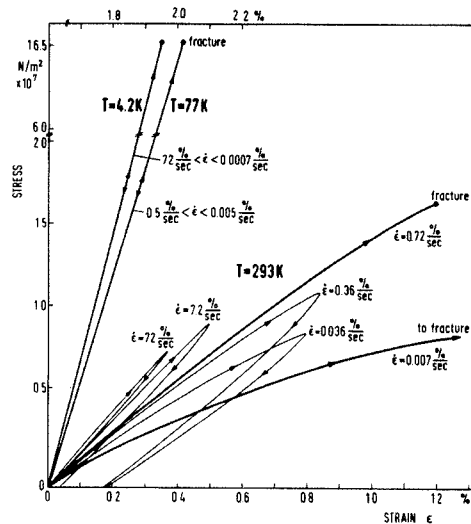


Fig. 8 Stress-strain behavior of epoxy resins at different strain rate, $\dot{\epsilon}$, and temperature, T (after Hartwing 1979).

폴리머의 거동은 상당한 복잡성을 띄우고 있다. 이와 같은 거동에 영향을 미치는 분자구조 (molecular structure)로는 (1) 고분자에 가지 를 치는 것(branching), (2) 분자량(molecular weight) 그리고 (3) 결정화도(crystallinity)이다. 이러한 요소들에 미치는 저온의 영향과 이에 따른 결과로 발생하는 재료거동의 변화는 최근에 들어 광범위한 연구결과들을 나타내고 있다. Appendix B에 가장 일반적인 폴리머의 저온에서의 거동 특성을 요약하여 나타내었다.

2.3 복합재료

몇 가지의 특정한 재료가 가지고 있는 고유의 특성들이 서로 결합되어 전보다 새로운 개념의 특성을 보이는 재료를 일반적으로 복합재료라고 정의를 내리고 있다. 이러한 구성 요소들은 크게 강화(reinforcement)를 목적으로 하는 강화제와 이를 서로 접합시켜 일정한 형태(form)로 유지토록 만드는 수지(matrix)로 나눌 수 있다. 저온에서의 사용조건을 고려하여 디자인을 할 경우, 복합재료는 다른 재료와는 비교할 수 없을 정도의 잇점을 가지고 있는데, 이는 복합재료만이 나타내고 있는 탄성계수나 강도에 비해 낮은 열적 거동 특성과 밀도에 비해 높은 탄성계수 및 강도의 특성등을 들 수 있다. 이론적으로 유리섬유-에폭시 형태의 섬유강화재료와 콘크리트와 같은 혼합재료 모두 개념으로 포함시킬 수 있다. Figure 9에 복합재료의 개념을 단순화시켜 각각의 특성에 맞게 분류한 것이다.

섬유강화 복합재료의 재료적 특성치는 다음과 같은 요소들에 크게 의존하고 있다. (1) 수지 형태(matrix type), (2) 섬유의 종류(fiber type), (3) 섬유 비율(fiber fraction), (4) 섬유 방향

(fiber orientation), (5) 섬유 분포(fiber distribution), (6) 섬유 강도(fiber strength), 그리고 (7) 온도 등이다. 또한 이러한 대부분의 특성치들은 이방성(anisotropic)을 가지고 있으며, 온도가 감소할수록 탄성계수, 인장강도, 휨성강도(flexural strength), 압축 강도가 증가하는 전형적인 특성을 나타내고 있다. 이러한 복합재료계는 성형기술(construction technique)의 개발 및 개선등으로 개개의 구성 성분들로부터 얻을 수 있는 성능들을 극대화하여 다양한 분야에서의 요구에 충족시킬 수 있는 것이다. 그러나, 복합재료계는 구조적으로 기존의 재료와 전혀 다른 새로운 개념이기 때문에 초창기에는 그 사용이 주로 특정한 기존의 금속재료를 선택적으로 대체하는 수준으로밖에 한정되어 있었으나, 이러한 소극적인 접근방식은 점차적으로 바뀌어가고 있다.

극저온(cryogenic level)상태에서의 복합재료 거동은 Kasen(Kasen1975, 1983)에 의해 광범위하게 연구되어졌다. 그의 논문에서는 이러한 저온 환경에 대한 연구 한계의 인식을 통해 지속적인 Data base의 구축의 필요성을 강조하였다. 또

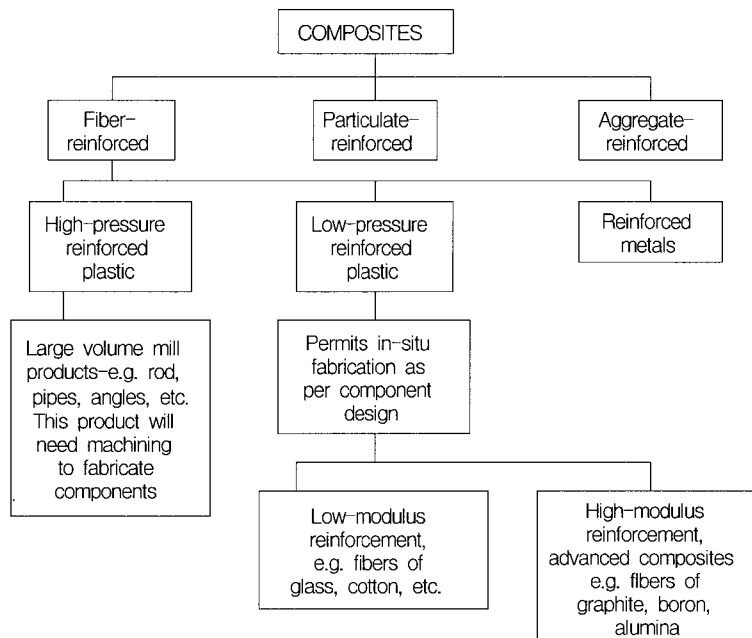


Fig. 9 Simple classification of composite system.

한 현재의 Data base로는 적용된 수지의 취성적 특성으로 인한 강도값의 변화가 심하여 그 유용성 및 정확성이 떨어진다. 이렇듯 저온에서의 수지의 파괴인성을 향상시키기 위한 연구는 계속적으로 진행이 되고 있으나 실용적인 관점에서 볼때에는 아직도 많은 연구 및 개발의 필요성이 강조되고 있다(Hartwing and Evans 1982). 대다수 복합재료계의 강도값에 대한 지금의 Data base는 그 실험온도가 주로 실온과 Cryogenic의 끓는 온도 (boiling point) 범위내에서만 이루어져 왔다. 저온에서 복합재료계의 강도값의 큰 차이는 앞서 언급을 한 것과 같이 고분자계 수지의 취성적 특성 때문이다. 이러한 차이는 성형방법에 의해 발생하는 내부의 공공(void)이나 수지 과다지역 등과 같은 내부적인 결함의 함수로써 해석을 할 수 있는다. 다시 말해서, 이러한 성형시 품질에 대한 고려에 보다 많은 시간을 투자함으로써 만들고자 하는 복합재료계의 강도 특성치를 원하는 요구에 충족될 수 있도록 조절할 수 있다는 것이다 (Kasen 1983).

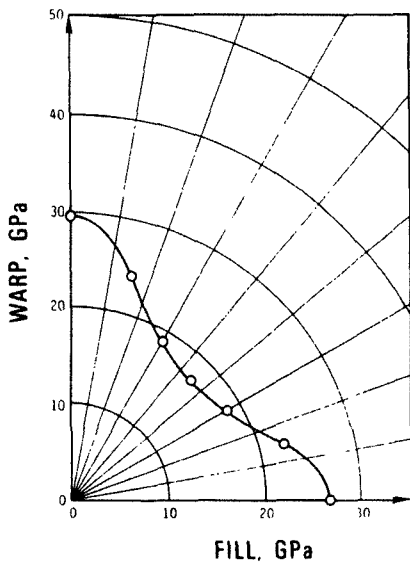


Fig. 10 Orientation dependence of Composite property.

복합재료가 나타내는 이방성은 주로 이를 구성하고 있는 강화제의 이방성에 그 기원을 두고 있

다 (Figure 10). 그래서 복합재료의 실험적 Data는 강화제로서 사용된 섬유와 밀접한 관계를 나타내고 있다. Figure 11은 두개의 서로 다른 섬유방향을 가지고 있는 유리섬유 강화된 에폭시계 복합재료의 온도 의존성을 나타낸 것이다 (Ledbetter 1979).

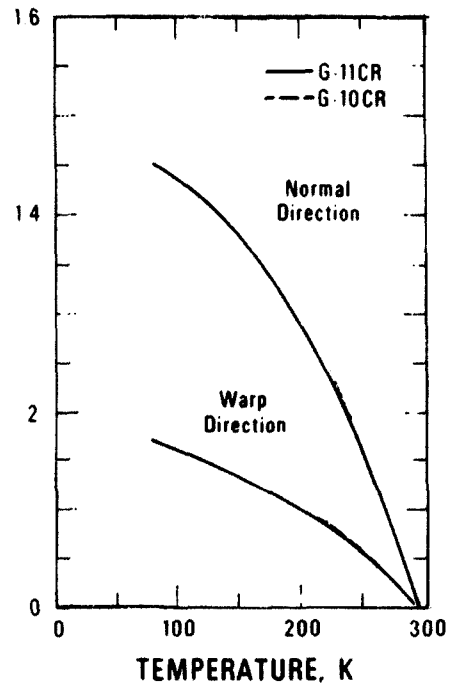


Fig. 11 Temperature dependence of composite property.

3. 저온 환경 조건하에서의 재료 시험 평가방법

3.1 전형적인 파괴 시험법

파괴에 대한 저항성은 그 재료가 사용되는 온도, 압축 그리고 변형률 등에 크게 좌우된다. 파괴가 발생하는 시점은 일반적으로 적용되고 있는 응력의 단계가 항복응력보다 낮거나 높은 단계에서 일어나며, 이는 구조물 내부에 잠재되어있는 결함의 크기, 하중을 받고 있는 부위의 두께 그리고 변형률에 크게 영향을 받는다.

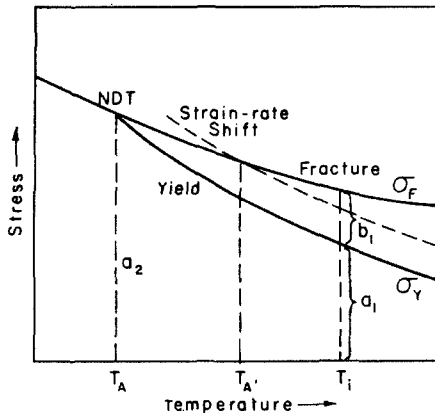


Fig. 12 Temperature effect on the fracture stress.

우선, 파괴에 미치는 온도의 영향에 대해 언급하기 이전에 Figure 4b 및 이를 좀더 도식화한 Figure 12을 보아야 한다. Figure 12에서 볼 수 있듯이 온도 T_i 에서 하중을 받는 재료는 우선적으로 소성항복을 일으킬 것이다. 그러나 이를 넘어 변형이 F 의 곡선에까지 이르게 되면, 응력 F 점에서 취성적으로 파괴의 양상이 나타날 것이다. 만약에 온도 T_i 가 Nil Ductility Temperature(NDT)인 T_A 보다 낮고 적용중인 응력이 F 점에 도달할 경우에는, 재료는 단순히 아무런 소성적인 변형을 동반하지 않은 상태로 파괴에까지 이르게 될 것이다. 앞서 언급을 하였듯이, BCC의 재료는 FCC재료에 비해 온도에 더욱 민감한 반응을 일으

킨다. 변형률은 Figure 12에 점선으로 표시된 것처럼 항복응력 y 의 곡선을 증가시킨다. 이는 T_A 보다 높은 온도범위에 취성적인 파괴가 발생할 수 있는 빈도를 높이게 되는 것이다.

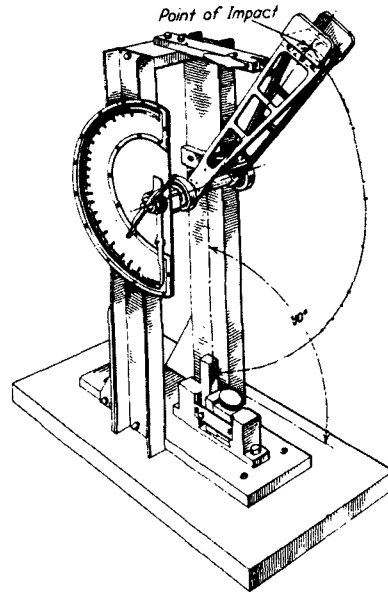


Fig. 14 Simple beam Charpy impact machine.

재료 가지는 파괴의 특성들은 크게 둘로 나누어 그 원인을 해석할 수 있는데, 첫째로는 재료를 평가할 시의 조건들로 시험온도, 변형률, 둘째는

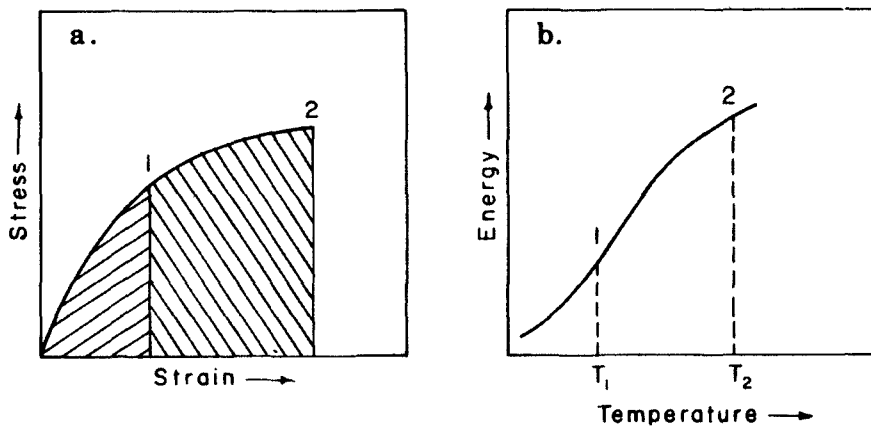


Fig. 13 Temperature effect on ductility.

내부 결함과 같은 재료 자체에 대한 조건으로 요약할 수 있다. 초기엔 샤르피 충격시험(ASTM 1966, Standard E-23)을 주 시험법(Figure 14)으로 채택하였었는데, 이는 시험편에 V형 노치, Keyhole노치와 같은 결함을 인위적으로 부여한 후에 높은 변형률하에서 시험을 하는 시험법이다. 이러한 결함과 높은 변형률은 재료의 NDT를 증가시키며, 결과로 알 수 있는 응력-하중 곡선의 에너지 연성과 관련지어 측정을 한다. Figure 13는 다른 두 온도범위인 T1과 T2 (T1<T2)에서의 에너지 변화를 나타내고 있다. 이러한 샤르피 충격 시험은 간단하면서도 경제적인 시험법으로 대체로 금속재료의 시험에 일반적으로 사용되어 왔다.

3.2 폴리머 및 복합재료의 파괴인성 시험법

과거엔 기존의 금속재료로부터 검증된 파괴 역학적 변수들로 폴리머, 세라믹 그리고 복합재료등과 같은 비금속성 재료의 파괴 특성을 시험하기 위하여 많은 시도를 해왔다. 그러나 광범위하게 적용될 수 있는 표준 시험법으로서의 파괴인성 시험법은 아직까지 불투명한 상태이다.

폴리머계 복합재료에 파괴 시험을 할 경우에는 변형률에 대한 민감성, 균열 첨단에서의 넓은 소성 영역등과 같은 다수의 변수등을 고려하여야 한다 (Marshall and Williams 1973). 따라서 대부분은 실온의 조건만을 고려한 시험들로 국한되어 있었으나, 최근에 들어서야 열경화성 에폭시 (Kneifel 1973)와 열가소성 폴리카보네이트로 제조된 구조물(Martin and Garberich 1976, Tober and McHenry 1983)에 대한 저온에서의 영향을 평가하는 연구들이 늘어가고 있다. 이에 따라 일반적으로 플라스틱의 KIC값은 저온에서 10Mpa-m^{1/2}보다 낮음을 알 수 있다.

복합재료는 성형시에 발생된 내부의 결함이 사용중에 점차로 그 크기가 커짐에 따라 결국엔 최종적인 파괴가 발생한다는 것은 익히 잘 알려진 사실이다. 이를 미시적인 관점으로 보면 금속재료가 나타내는 거동과 거의 유사함을 알 수 있다. 즉, 금속 결정은 이방성을 가지고 있으며, 이러한

연속적인 결정들의 집합체는 불균질적인 특성을 가짐은 명백한 일이다. 그래서 파괴 역학적으로 접근을 한다면, 균질적인 재료로서 가정할 수 있는 복합재료는 공학적인 해석과 거동에 대한 예측이 가능하게 되며, 이런 파괴역학적 개념을 사용하여, 1972년에Corten은 두 가지의 서로 다른 재료 및 이를 접합시킨 복합재료의 파괴를 해석하기 위한 수학적 모델을 개발하였다. 그러나 해석시에 고려해야 할 많은 문제점들을 배제한 결과 광범위하게 적용하기엔 그 한계성을 가지고 있으며, 주로 다른 형태의 구조를 가지는 복합재료에 수학적 접근을 가능케 하는 방법으로 사용되어지고 있다.

4. 기대 효과

저온을 조건으로 하는 시험법들로부터 기대할 수 있는 정보들은 각각의 재료가 나타내는 거동들을 포함하여 탄성적 또는 비탄성적인 한계들이다. 대체적으로 현재 진행되고 있는 연구들은 적용온도의 감소와 변형률의 증가를 통한 계수값 및 강성의 변화되는 특성을 그 기본으로 하고 있으며, 전형적인 단일축 인장, 압축 그리고 굽힘 시험 및 샤르피 V-노치 시험들을 토대로 하여 저온에서의 각각의 재료 특성들을 비교 평가한 후 좀 더 실용적인 규명이 가능한 시스템적 접근 방법으로 바뀌고 있다. 공학적인 디자인에 적용하기 위해서는 반드시 파괴 역학적인 시험법으로 얻어진 Data Base의 구축이 요구된다. 이러한 시험들에 의한 결과는 균열 첨단에서의 응력 집중 계수인 KIC값과 다양한 온도와 하중 비율(load rate)하에 균열로 발전되지 않을 최소의 결함 크기에 대한 정보들을 알려주고 있다. 또한 저온에서의 피로 시험은 재료들이 실제의 외부 환경에서 사용될 경우에 파괴 단계까지 이를 수 있는 다수의 원인을 규명하기 위해 일정한 하중사이클(load cycles)을 적용한 후에 실행되고 있다.

아직까지 다양한 폴리머계의 복합재료에 대한 일반적인 적용이 가능한 보편적인 표준 시험법은 규정되어 있지 않은 상태이나, 금속이나 기타 다른 등방성 재료들에 대해선 파괴 역학적인 개념으로

접근하여 상당한 연구 성과들이 축적이 된 상태이다. 다시 말해서, 복합재료의 파괴 역학적 특성은 더 많은 이해가 필요하지만, 다양하게 표출되는 특성들에 대한 보다 정확한 해석을 가능케 할 수 있는 시험법의 개발과 이를 체계화시킬 수 있는 시스템은 현재까지 도입단계에 불과하다.

시험과정 중에 얻게되는 기초적인 강성 및 강도 Data, 다수의 부수적인 특성치에 관한 정보들은 복합재료를 이용한 구조물들을 디자인하는 과정에 상당한 도움을 줄 수 있다. 즉, 복합재료 빔 (beam) 구조물에 대한 피로 시험과 인장 시험중에 Acoustic Emission 특성치를 얻을 수 있으며, 새로이 부각되고 있는 비파괴 시험인 Infrared Imagery Technique(IIT)를 통해 구조물 내부에서 진행되는 균열 핵성장(crack nucleation)을 규명할 수 있으며, 균열의 성장 정도 또한 비교적 정확히 확인할 수 있다. 강화제로 쓰인 섬유와 단절 현상(filament dislocation)의 관찰이 가능한 X-Ray에 대한 연구, Fractography 그리고 Scanning Electron Micrography (SEM) 기술 등은 복합재료의 파괴 현상을 해석하고 이해하는데 그 사용빈도가 더욱 높아지고 있다. 그러나 실온에서의 시험에 의해 얻어진 결과를 상당히 축적이 이루어져 있으나, 낮은 온도환경에서의 복합재료의 기본적인 거동을 규명할 수 있을만큼의 저온 시험은 아직까지 부족한 단계에 머물고 있다.

따라서, 점차적으로 실제적 요구가 증가하고 있는 복합재료에 대한 충분한 지식을 바탕으로 한 각각의 사용환경하에서의 복합재료 구성성분간의 특성 및 결합에 의한 혼합적 특성을 충분히 이해하고, 해석할 수 있는 보편적인 시험법의 도입 및 개발이 더욱 시급함을 강조하면서, 또한 극한지 환경에서의 재료거동을 이해하는데에 조금이나마 도움이 되었으면한다.

References

- [1] McClintock, F.A. and S.A. Ali, 1966, Mechanical Behavior of Materials, Reading Mass., Addison-Wesley, pp. 546~561
- [2] Baldy, M.F., 1976, The Development of Large-Diameter High Strength Line Pipe for Low Temperature Service, Offshore Technology Conference, paper no. OTC2667
- [3] Hansen, O.A., 1960, Materials for Low Temperature Use, Short Course on Process Industry Corrosion, In Proceedings, National Association of Corrosion Engineers, Houston, pp. 273~286
- [4] Hartwing, G., 1979, Mechanical and Electrical Low Temperature Properties of High Polymers, In Nonmetallic Materials and Composites at Low Temperature (A.F. Clark, R.P. Reed and G. Hartwing, Ed.), New York, Plenum Press.
- [5] Hartwing, G. and D. Evans, 1982, Fundamental and Applications of Nonmetallic Materials at Low Temperature, New York, Plenum Press.
- [6] Kasen, M.B., 1975, Properties of Filamentary Reinforced Composites at Cryogenic Temperatures, In Composite Reliability, Philadelphia, ASTM STP 580, American Society for Testing and Materials, pp. 586~611
- [7] Kasen, M.B., 1983, Composites, In Materials at Low Temperatures (R.P. Reed and A.F. Clark, Ed.), Metals Park, Ohio, American Society for Metals, pp.413~463
- [8] Ledbetter, H.M., 1979, Dynamic Elastic Modulus and Internal Friction in G-10CR and G-11CR Fiberglass-Cloth-Epoxy Laminates, NBSIR 79-1609,

[1] McClintock, F.A. and S.A. Ali, 1966,

- Boulder, Colorado, National Bureau of Standards.
- [9] Marshall, G.P. and J.B. Williams, 1973, The Correlation of Fracture Data for PMMA, *Journal of Material Science*, 8: 138~140
- [10] Kneifel, B., 1979, Fracture Properties of Epoxy Resins at Low Temperature, In *Nonmetallic Materials and Composites at Low Temperatures*, New York, Plenum Press, pp. 123~129
- [11] Martin, G.C. and W.W. Gerberich, 1976, Temperature Effects on Fatigue Crack Growth in Polycarbonate, *Journal of Materials Science*, 11: 231~238
- [12] Tobler, R.L. and H.I. McHenry, 1983, Fracture Mechanics, In *Materials at Low Temperature* (R.P. Reed and A.F. Clark, Ed.), Metals Park, Ohio, American Society for Metals, pp. 269~293
- [13] Piyush K. Dutta, 1989, Behavior of Materials at Cold Regions Temperature, Special Report 88-89, U.S. Army Corps of Engineering.

APPENDIX A: LOW TEMPERATURE BEHAVIOR OF SOME STRUCTURAL METALS AND ALLOYS.

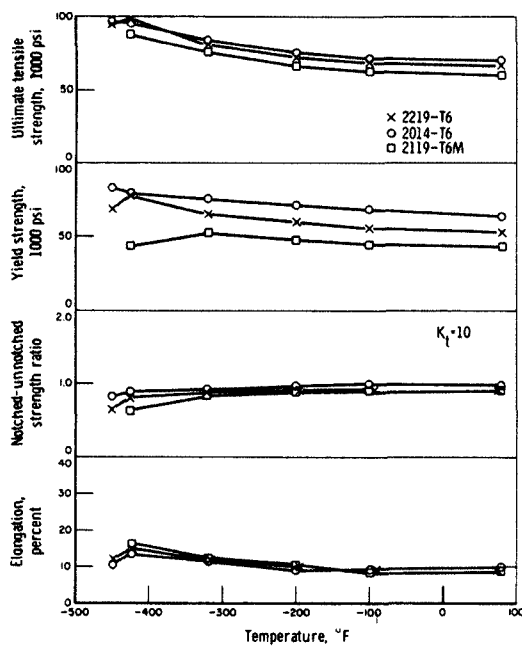


Fig. A1 Tensile properties of 2000 series Aluminum alloys in the T6 condition (Martin et al. 1968).

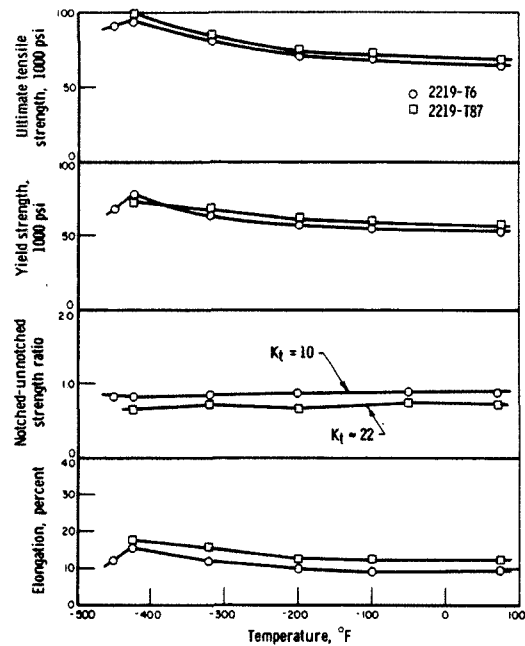


Fig. A2 Effect of heat treatment on 2219 aluminum alloy (Martin et al. 1968).

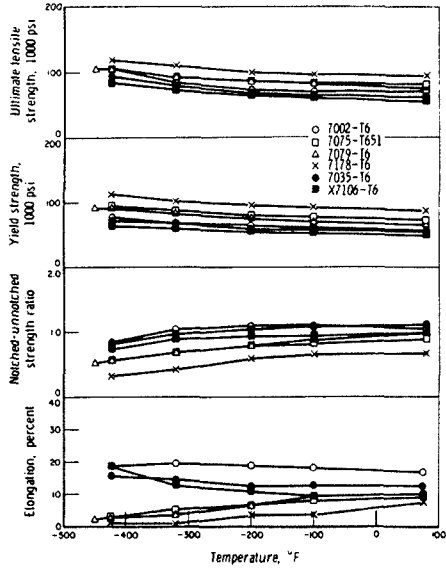


Fig. A3 Tensile properties of 7000 series aluminum alloys in the T6 condition (Martin et al. 1968).

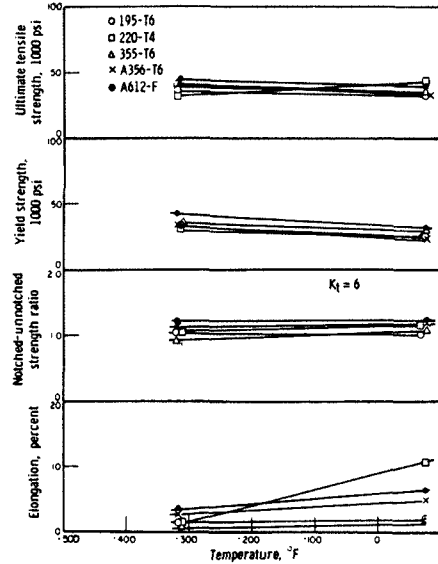


Fig. A4 Tensile properties of aluminum casting alloys (Martin et al. 1968).

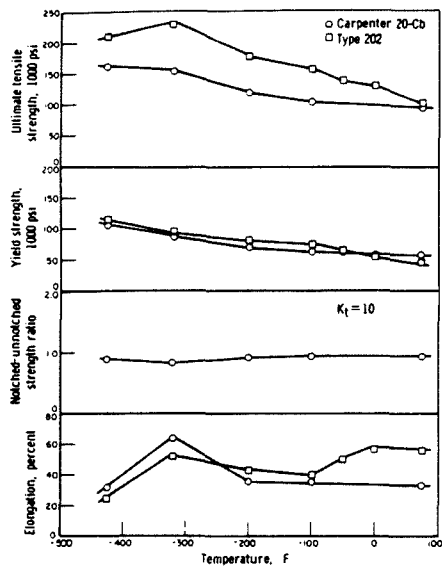


Fig. A5 Tensile properties of austenitic stainless steel (Martin et al. 1968).

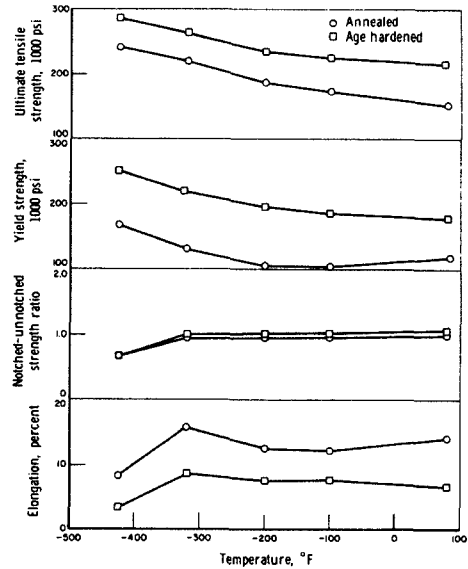


Fig. A6 Tensile properties of HP 9-4-25 steel (Martin et al. 1968).

APPENDIX B: LOW TEMPERATURE BEHAVIOR OF SOME SELECTED POLYMERS

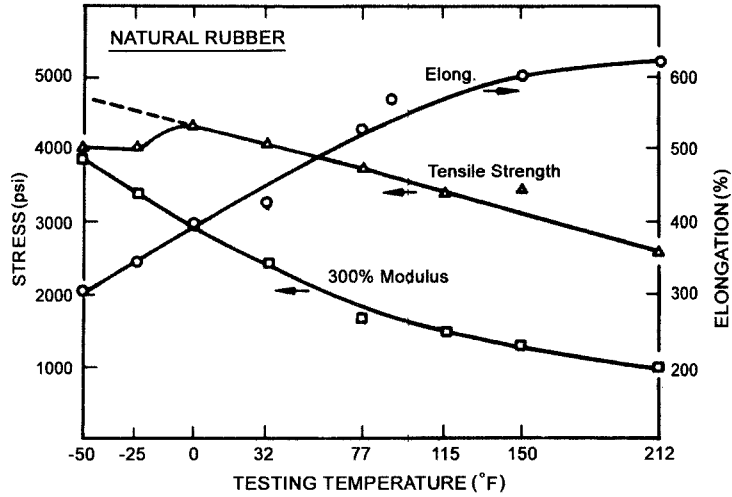


Fig. B1 Effect of testing temperature on stress-strain properties for natural rubber (Rittenhouse 1968).

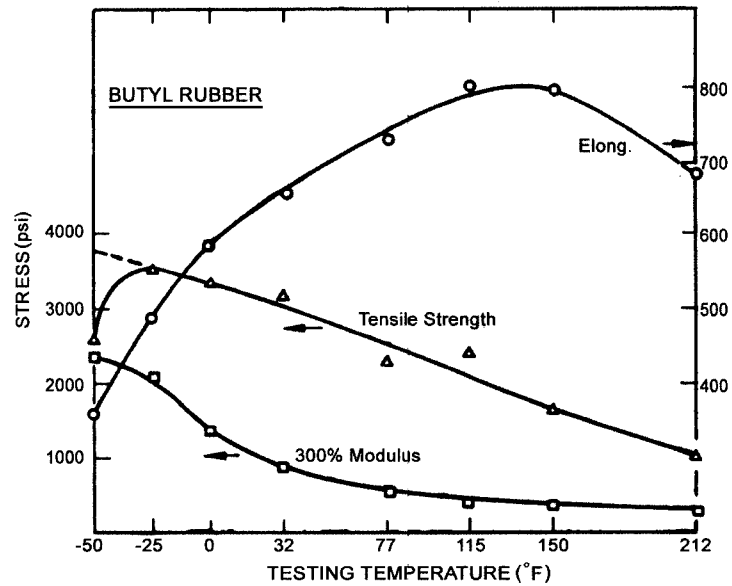


Fig. B2 Effect of testing temperature on stress-strain properties for butyl rubber (Rittenhouse 1968).

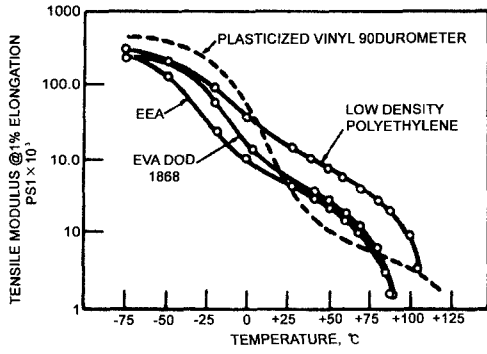


Fig. B3 Stiffness modulus vs temperature of Polyethylene, polyethylene copolymers and vinyl (Titus 1967).

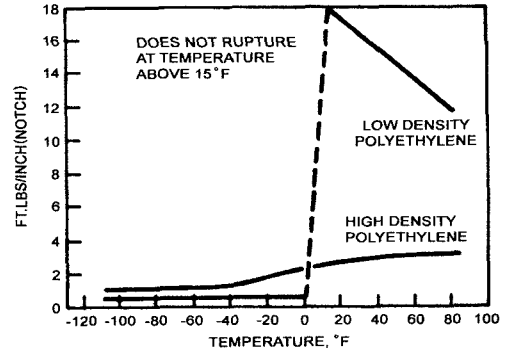


Fig. B4 Effect of temperature on Izod impact strengths of (Marlex) polyethylene (Titus 1967).

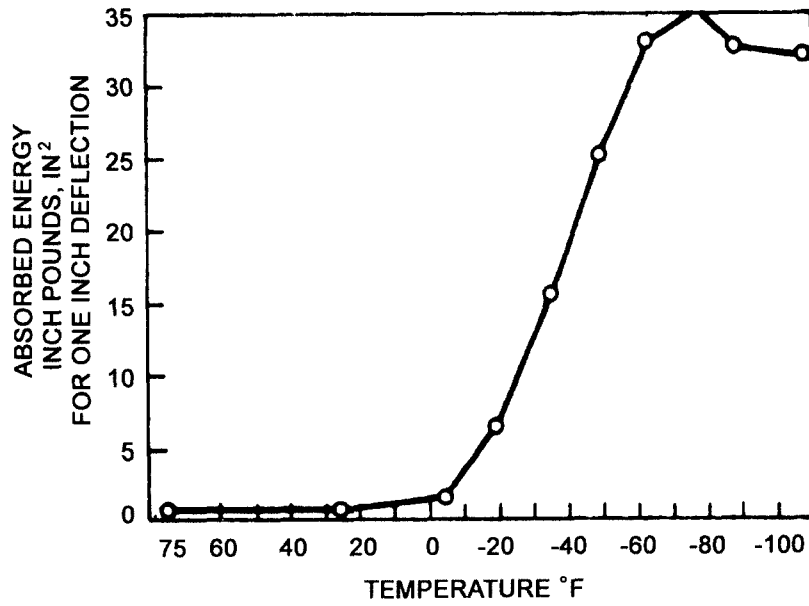


Fig. B5 Urethane foam absorbed energy vs temperature (Titus 1968).

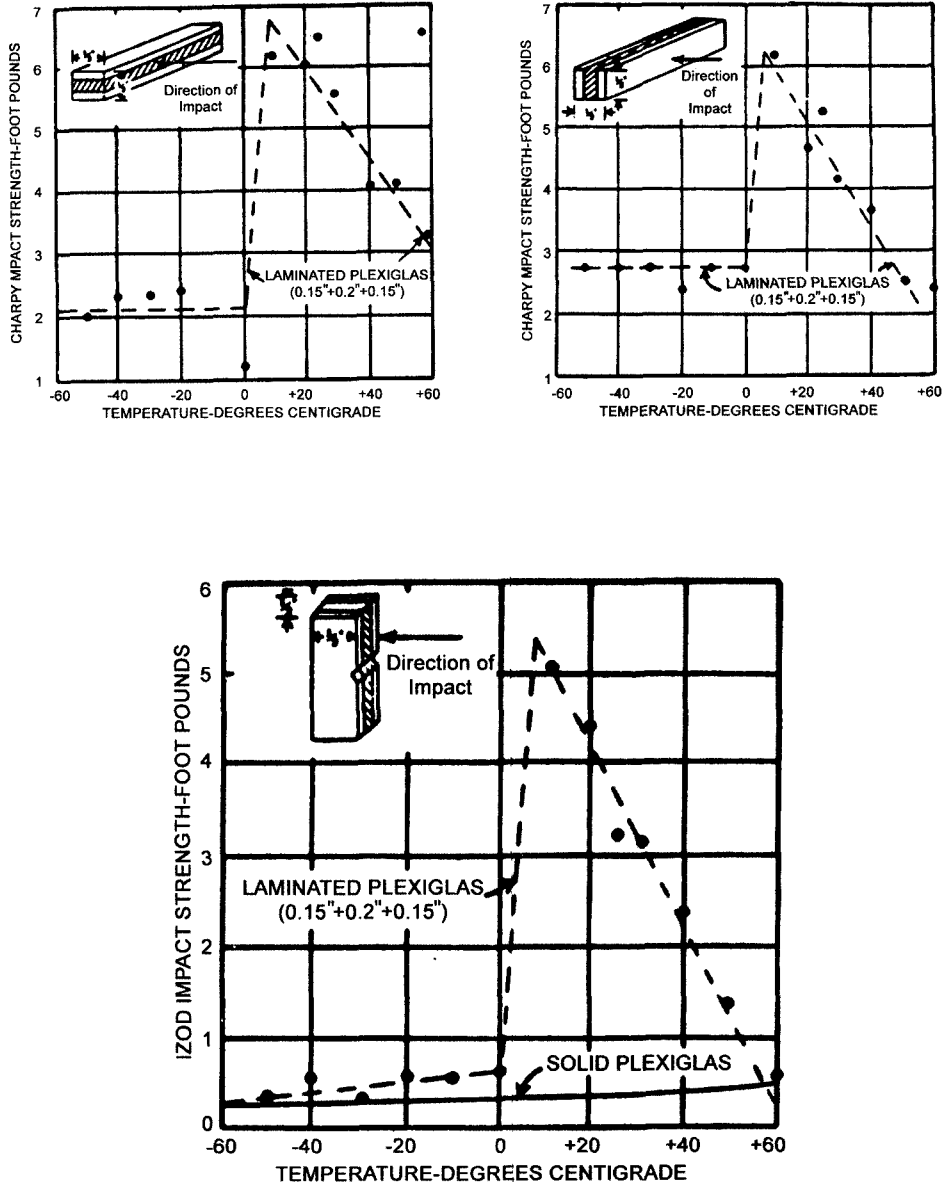


Fig. B6 Impact strength of laminated acrylic (Plexiglas) (Titus 1967).