어쿠우스틱 에밋션法에 依한 摩擦熔接 強度解析(Ⅰ)

吳 世 奎
<釜山水產大學 舶用機械工學科>

1. 序 論

摩擦熔接(摩擦壓接)은 固相熔接法으로서, 두 摩擦面에서 發生한 摩擦熱을 利用하여 高壓下에서 두 面을 鍛接시키는 壓接法이다. 이 摩擦熔接法은 經濟的, 技術的 利點이 매우 크다는 사실이 學問的으로나 生產現場에서 立證되어 왔다[1]. 그러나摩擦熔接法을 利用함에 있어서 특히 오늘날과 같이 大量生產을 위한 自動化 傾向에 있어서는 熔接品質의 높은 信賴性이 要求되며 主要한 關心事중 하나이다. 摩擦品質(强度)을 生產工程 중에 定量的으로 檢出할 수 있고 管理할 수 있는 信賴性 있는 非破壞檢出法이 있다면 이는 매우 有益하며 劃期的 發見이 아닐 수 없다. 그리하여 1976年에 超音波法을 適用하여 熔接强度를 非破壞的으로 檢出코져 시도된 바[2] 있으나 불행히도 그 結果는 解析上 문제점이 있었고, 超音波의 側面反射가 현저하지 않은 熔接構造에만 制限되고 定量解析이 곤란함이 判明되었다.

그 후 1980年과 1981年에 筆者等의 연구진에 依해 어쿠우스틱 에밋션(acoustic emission; AE)法을 利用한 熔接强度의 生產工程中의 非破壞檢出法과 定量解析法의 開發硏究가 새로이 試圖되므로써, 그 結果, 첫째, AE法에 依해 鐵金屬의 摩擦熔接에서 熔接强度의 工程中 非破壞檢出이 可能함이 1982年에 發表되었고[3], 熔接條件(回轉速度)과 熔接 初期 에너지를 매개변수로하여 AE에 依한 摩擦熔接實驗과 95% 信賴性試驗을 통하여 그 定量解析이 可能함이 立證되었다[4),5]. 특히 이너어셔型(intertia type)의 摩擦熔接뿐만 아니라 브레이크形(brake type, 혹은 continuous drive type)摩擦熔接에도 AE法에 依한 工程中 强度解析이 可能함이 立證되어[5], 從來의 摩擦熔接條件의 最適化[6]와 동시에 熔接强度의 工程中 檢出과 定量的 强度의 最適化管理[5]가 非破壞的으로 가능함이 입증되었다. 本稿에서는 그 첫째의 경우를 중심하여 해설하고자 한다.

2. AE의 歷史的 背景

어쿠우스틱 에밋션 解析을 최초로 이용한 것은 아마도 地震學일 것이다. 地震에 依해 발생된 彈性波가 放出 에너지, 位置, 깊이 等으로 결함운동의 特性을 위하여 解析되었다. 또한 탄광에서의 암석 붕괴 탐색의 가능성을 예측하기 위해 AE에 관한 硏究가 초기에 修行되었다.

金屬에서의 AE에 關한 관찰이 주석(tin)의 雙晶變形(twinning deformation)때에 초기에 이루어진 바 있었고, 그 후 鋼의 熱處理중 마르텐사이트 變態가 AE의 發源中 하나임이 연구되었다. 1950年代에 독일의 J. Kaiser[7]에 依한 硏究가 금일의 AE에 관한 연구의 시초로서 인정받게 되었고, 그는 최초로 金屬의 變態 중에 發生된 可聽音響을 檢出하기 위해 전자기구를 사용하였다.

그 후 美國에서는 1950年 중반에서부터 Sch-

ofield[8]와 Tatro[9]가 AE에 관해 연구를 시작하여 AE 기기의 改良과 AE 發源을 명백화시켰다. 그들은 Kaiser에 依해 提案되었던 'AE의 粒子境界미끄름(grain boundary sliding) 基因說'보다 '金屬의 AE는 塑性變形을 수반하는 轉位(dislocation)運動에 基因한다'는 說을 주장하였다.

1960년대에 들어서서 美國에서의 AE에 관한 發展은 매우 현저하였으며, 1967년 U.S. Acoustic Emission Working Group(AEWG)가 發足되어, 1978년 12월에 제19차 學術發表會가 개최된 바 있다. 1960년 후반부터 유럽과 일본에서의 연구 활동도 처음엔 주로 核分野에서의 努力으로부터 활발해져 European Working Group on AE(EWGAE)가 1972년에 發足되어 오늘날까지 영국, 프랑스 등에서 年次大會가 개최되어 많은 研究發表가 있었다.

일본에서는 Japanese Committee on Acoustic Emission(JCAE)이 일본 비파괴검사학회 (Japanese Society for Nondestructive Inspection)의 협찬으로 일본고압협회(High Pressure Institute of Japan)에 依해 1969년에 發足된 후 오늘날까지 AE에 관한 국제 심포지움등이 여러차례 개최되어, AE에 관한 연구와 발전이 오늘날 미국의 水準에 달한다고 말할 수 있을 것이다.

上記 여러 나라 외에도 AE 연구와 발전 활동이 서독, 이태리, 덴마크, 항가리, 인도, 호주, 남 아프리카, 소련 등에서 발표되어와, 현재 全世界에서 AE에 실제 종사하는 專門家 총수가 2000명을 넘는다고 한다.

1966년부터 1972년까지의 AE가 材料研究와 構造完全性(structural integrity) 評價에 利用된 分野는 引張試驗, 壓力容器試驗, 破壞力學試驗, 構造評價, 缺陷位置, 現場環境, 트랜스듀서(transducer)쇄신, AE기기 쇄신, 應力腐蝕試驗, 필라멘트合成材料, 生產監視, 複合셀 構造物, 相變態檢出, 應力破壞試驗, PIGMAW(pressure inert-gas metal arc welding)監視, 電氣抵抗熔接監視, 熔接材料檢定, 레이저 글래스 損傷발단(laser glass damage threshold), 極小部品 品質檢定, 레이저 熔接監視, 레이저시스템 完全性檢査, 電子비임熔接監視, 나사破壞豫測, 高壓暴發龜裂探査等이다.

오늘날 AE가 工業分野에 應用되는 예를 技能別로 分類한다면 다음과 같다.

- 作業前 確認試驗(preservice proof testing)
- 作業中 品質再確認試驗(inservice requalification testing)
- 部品과 시스템의 온·라인 감시(on-line monitoring)
- 漏洩檢査와 位置確認
- 工程中熔接監視(in-process weld monitoring)
- 機械的 性質試驗과 特性化
- 地質學的 應用

上記 應用은 모두 構造材料나 構造物의 缺陷과 疲勞破壞要因의 探索等에 根據를 두고 있다. 특히 GTAW(gas tungsten-arc welding), GMAW(gas metal-arc welding), SAW(submerged arc welding), SMAW (shielded metal-arc welding), 管熔接, 시임熔接, 壓力容器熔接 등의 熔接工程中에 크랙, 熔入不足(lack-of-penetration), 융해불량(lack-of-fusion), 多孔性 (porosity), 텅스텐(tungsten)과 슬랙섞임(slag inclusion)등의 熔接缺陷이 AE기기에 依해 非破壞的으로 檢出되며 評價되어지고 있다.

그런데, 最近 1980년부터 固相熔接法인 이너어셔型의 摩擦熔接에서 熔接强度(引張强度)를 AE에 依해 檢出하고, 定量解析을 시도하므로써 摩擦熔接의 온·라인 품질관리 시스템(on-line quality control system)開發을 目的으로 한 研究가 筆者等의 研究陣에 依해 처음으로 시도되었고 그 일부가 1982년 4월 27일 AWS의 63회 年次大會(Annual Convention)에서 發表된 바 있고[3], 또한 韓國舶用機關學會의 1982년 春季學術研究發表會(4월 23일)에서의 發表[4]와 大韓機械學會 釜山慶南支部의 1982年 春季學術講演會(5월 8일)에서의 發表[3),5)]가 있었다.

3. 摩擦熔接으로부터의 AE의 發源

어쿠우스틱 에밋션은 材料內에서의 변형에너지

(strain energy)의 急速한 放出로부터 일어나는 現象이다. 이 에너지의 일부는 材料表面에서 檢出 可能한 彈性波의 형태로서 發源으로부터 放出한다[8]. AE의 주된 發源은 材料에 미치는 機械的, 熱的, 金屬的 工程일 수 있다[9),10)]. 摩擦熔接은 高壓과 高溫下에서 修行되며, 結果的으로 壓接面으로부터 材料의 大規模 塑性流動을 誘發시켜 플래쉬(flash)를 형성케한다. 熔接사이클 즉 摩擦熱과 다음의 鍛造作用과 冷却期 등이 熔接部의 微視組織의 變化를 일으킨다. 機械的應力과 熱應力[11]뿐만 아니라 組織의 變化도 AE를 發生시킨다. 이러한 마이크로 組織變化에는 轉位(dislocation)運動, 空間(vacancy)과 벌어진 틈(interstitial site)의 生成과 섬멸, 슬립라인(slip line)과 雙晶(twinning)의 發達, 크랙의 發生과 成長 및 相變態 等이 포함된다.

上述한 바에 依하면 분명히 摩擦熔接에서도 활발한 AE의 發源이 있다고 생각되며 이는 그림 1에서와 같은 두 炭素鋼棒의 摩擦熔接에서 發生한 代表的 AE카운트率(單位時間에 對한 AE量)에 依해 確認될 수 있다.

그림 1에서 A域으로 나타내지는 AE量은 주로 熔接中의 大量의 塑性變形에 基因한다.

그림 2는 摩擦熔接의 一種인 이너어셔型 摩擦熔接사이클 特性의 典型的 例를 나타낸다. 初期段階인 단계 I에서 두 表面의 격렬한 운동이 高壓下에서 급히 變形을 일으키고 加壓에 依한 軸方向의 變位가 급히 증가하게 된다. 단계 II에서는 變位가 계속 증가하나 훨씬 더 느린 速度이며 마침내 壓接面의 溫度가 높은 수준에 到達하여 단계 III에서 행해지는 鍛造作用에 依하여 多量의

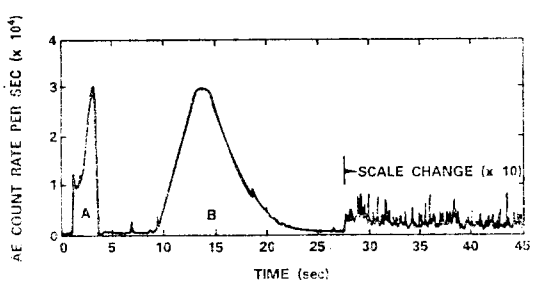


그림 1 鋼棒의 摩擦熔接(inertia type)에서 發生한 어쿠우스틱 에밋션의 代表的 記錄結果.

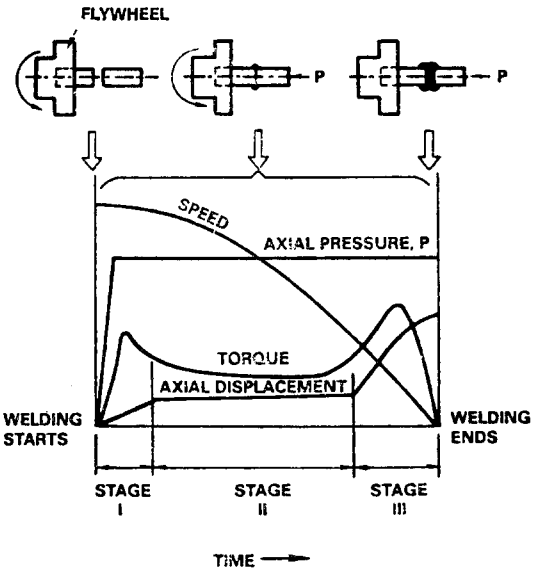


그림 2 이너어셔型 摩擦熔接에서의 工程 變數의 特性.

材料가 熔接部로부터 押出되어 外部로 나온다. 결과적으로 摩擦熔接에 있어서 熔接사이클 중의 塑性變形에 依하여 어쿠우스틱 에밋션의 돌출(그림 1의 A域에 해당)이 發生함을 알 수 있다.

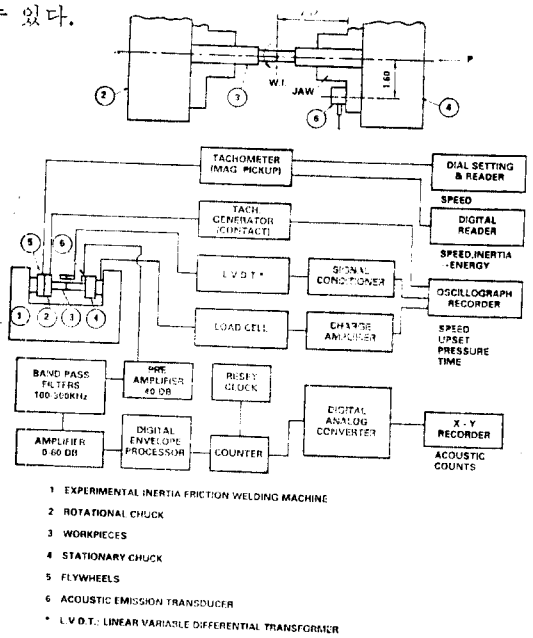
熔接過程이 끝날 즈음에는 壓接面에서의 材料는 最高溫度가 約 1300°C[12]가 넘게 되며, 그러나 熔接過程이 끝난 직후에는 주로 熱傳導에 依해 冷却하게 된다. 어쿠우스틱 에밋션의 두번 째 돌출은 熔接終了後 2, 3초 지나서 일어난다. 그림 1에서 B域에 해당하는 이러한 AE 돌출은 A域의 AE보다 더 오랫동안 계속된다. 이 段階에서는 機械的으로 유발된 모든 應力波의 發源이 정지된 상태이므로, AE의 放出은 아마 材料의 熱的 및 金屬學的 特性變化로부터 基因되는 듯하다. 冷却時, 熔接面과 熱影響部의 높은 溫度分配는 熱應力을 發生케한다. 문헌[13),14)]에 依하면 炭素鋼의 熱處理때, 마르텐사이트 變態가 일어나면 AE가 大量 發生한다고 알려져 있다.

4. 摩擦熔接工程中 强度의 檢出과 定量解析可能性에 關한 實驗[3]

4.1. 實驗裝置와 實驗方法

熔接試驗은 플라이휘일型(이너어셔型)의 摩擦

熔接機械에서 修行되었다. 그림 3은 실험 장치에서 사용된 모든 주요기기요소를 나타내는 개략도이다. 熔接機械는 最大回轉數 4500 rpm인 油壓도우터에 依해 驅動된다. 회전수는 기계 조종판의 아나로그 速度 조종다이얼에서 프리셑될 수 있다.



1 EXPERIMENTAL INERTIA FRICTION WELDING MACHINE
2 ROTATIONAL CHUCK
3 WORKPIECES
4 STATIONARY CHUCK
5 FLYWHEELS
6 ACOUSTIC EMISSION TRANSDUCER
* L.V.D.T.: LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER

그림 3 諸主要機器要素를 포함한 實驗裝置의 개략도(2.12=53.85 mm, 1.60=40.64 mm).

한편 磁氣 픽업을 사용한 디지탈 타코미터(digital tachometer)에 依해 더욱 정확한 스핀들 回轉數를 디지탈 리이드아웃에서 읽을 수 있다. 또한 아나로그 타코미터 제너레이터를 회전 척에 부착하여 연속 회전수 이력을 오실로그래프(oscillograph)에 기록하도록 하였다. LVDT (linear variable differential transformer)와 피에조일렉트릭 荷重셀을 사용하여 軸方向變位와 推力을 각각 檢出할 수 있도록하여, 이 두 履歷을 回轉數와 함께 하니웰 그래픽 자료획득 시스템(Honeywell graphic data acquisition system; model 1858)에 동시 기록시켰다.

그림 3의 下部 개략도는 Dunegan/Endevco 어쿠우스틱 에밋션 분석시스템(acoustic emission analyzing system; model 3000)을 나타낸다. 정지 척(chuck)上에나 직접 試片表面上에 부착한 트랜스듀우서(transducer)로부터 전달된 AE 신호는 X-Y 기록계에 기록되며 그 기록 결과는 단위 시간당 AE 量(count rate) 또는 AE의 누적 총량(cumulative total counts)의 형태로 表示될 수 있었다. AE 機器는 AE의 數로 表示될 수 있도록 디지탈 리이드아웃을 갖추고 있다. 周波數 範圍의 넓은 스펙트럼을 카버하는 擴範圍한 發源으로부터 AE가 發生했기 때문에 高感度 트랜스듀우서(Dunegan Model 9203)가 프리앰플리화이어(preamplifier)와 함께 선정되었고 AE 시스템게인은 약 75 db이 전달되었다.

그림 4에 나타내어진 바와 같이 두 종류의 熔接用 試片과 接合形狀이 大部分의 實驗을 위해

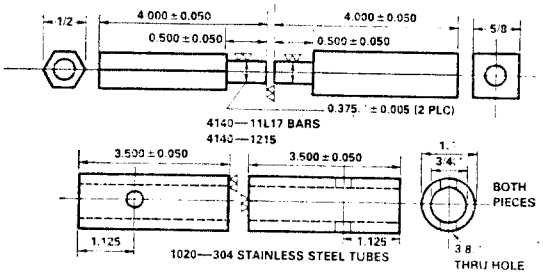


그림 4 두 종류의 熔接試片(棒과 棒 및 管과 管熔接)모양과 치수. (용접면 지름 : 0.375 ϕ =9.525 mmϕ, 1 ϕ=25.4 mmϕ, 3/4 ϕ =19.05 mm ϕ).

채택되었다. 棒의 六角斷面은 척의 죠오에서 試片이 미끄러지는 것을 방지하기 위함이며 이는 미끄럼에 의한 원치않는 AE의 추가 발생을 막기 위해서였다. 熔接試片의 다른 한쪽 끝은 그 斷面이 正四角形인데, 이는 척죠오에서의 미끄럼 방지와 AE 트랜스듀우서의 부착이 용이토록 하기 위함이었다. 熔接될 두 試片 끝 면은 연삭한 후 지름 9.525 mmϕ(3/8 in)로 선삭하였다. 引張試驗을 위하여 熔接 플래쉬(weld flash)를 제거한 후 熔接面(weld interface) 원주표면상에 半徑 0.635 mm(0.025in)의 半圓 노치를 연삭 가공하여 熔接面에 引張破斷이 생기게 하므로써 실제의 熔接强度를 반영하도록 하였다. 트랜스듀우서 面의 부착시 양호한 接觸連結을 위하여 Dow-Corning 製의 高眞空用 그리이스를 양쪽 접촉부분에 발라 AE 成果(events)의 정확

한 測定이 이루어지도록 하였다. AE 트랜스듀우서의 부착 위치의 영향을 결정짓기 위하여 별개의 실험을 행한 결과, 그림 5에서 보여준 바와 같이, 2개의 다른 위치에 트랜스듀우서를 부착시켰을 때의 熔接中 AE 성과의 일반적 특성은 근본적으로 같다는 것이 확인되었다. 즉, 처음엔 트랜스듀우서를 停止側 熔接試片上(熔接面에서 38.1 mm(1.5 in))에와, 두번 째는 熔接面에서 53.85 mm(2.12 in) 떨어진 위치의 죠오上에 옮겨 부착시켰다. 분명한 정미효과를 말한

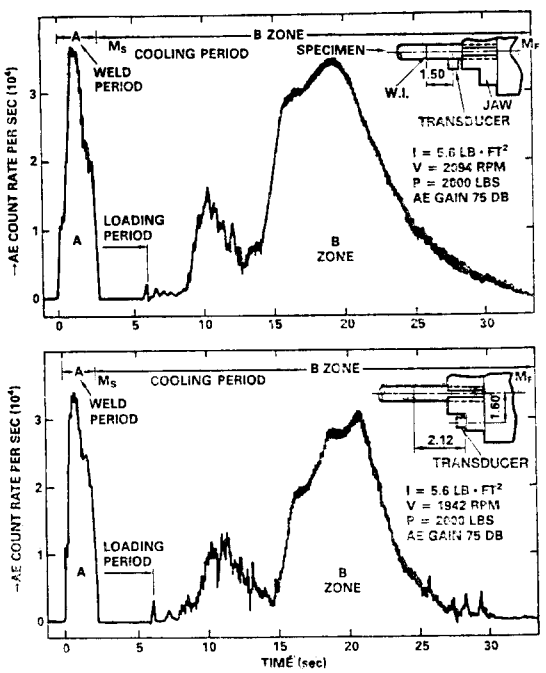


그림 5 트랜스듀우서 위치(熔接試片上과 停止 쳑上)가 AE에 미치는 영향.
(1.50=38.1 mm, 2.12=53.85 mm, 1.60=40.64 mm, 5.6 lf·bt²=0.236 kgfm², 2000 lbs=907 kgf).

다면, 후자의 경우가 AE 카운트率(曲線下의 面積으로 表示됨)의 全振幅이 약간 더 작았다. 이것은 아마 應力波가 보다 긴 통로를 지나서 熔接試片과 죠오 사이의 境界面을 通過할 때의 材料의 어쿠우스틱 임피이던스에 기인된다고 생각된다.

약 200개의 熔接試片을 제작하여 적절한 재료의 선택, 실험 조건 선정, AE 檢出시스템의 周波數 特性把握, 適合한 AE 트랜스듀우서의 選擇等을 위하여 광범위한 熔接條件下에서 實驗이 수행되었다. AE의 發源調査를 위하여 6개 종류의 炭素鋼과 合金鋼(炭素含量範圍 0.08%~0.38%)이 熔接材料로서 사용되었다. 또한 2個의 非鐵金屬인 알루미늄과 銅이 실험에 使用되어, 鐵金屬熔接과 非鐵金屬熔接이 AE에 미치는 서로 다른 영향을 조사하였다.

한편 上述한 6개의 鐵金屬과 2個의 非鐵金屬에 대하여 일련의 담금질(quenching) 실험을 행하여 AE 現象을 比較調査하였으며, 이 때 熱處理(담금질)試片의 한 쪽 끝을 산소-아세틸렌 토오치로써 약 900°C로 가열하였고(試片의 다른 한 끝에는 AE 트랜스듀우서를 부착시켜 두었음), 그 후 즉시 水冷, 油冷 및 空冷을 시켜 相異한 冷却率이 AE에 미치는 영향을 조사하였다.

4.2. 實驗結果와 考察

기본 데이터를 얻기 위하여 軟鋼棒의 摩擦熔接부터 시작하였다. AE 檢出用 트랜스듀우서의 適切한 選擇과 位置決定, 周波數範圍決定 AE동력게인(power gain)의 容量決定 等에 依해 機械振動으로부터의 여하한 영향도 제거될 수 있었다. 예비 조사의 결과로서, AE의 두 현저한 영역이 있다는 事實이 發見되었고, 즉, 그 하나는 軟鋼

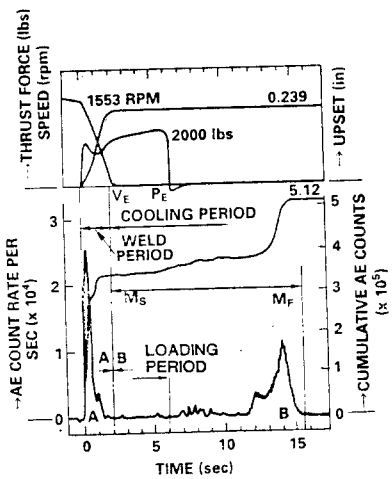


그림 6 鋼의 摩擦熔接(이너어셔型)에서 熔接變數와 對應하는 AE 履歷의 代表的 記錄結果.
(0.239 in=6.1 mm, 2000 lbs=907 kgf).

熔接工程中에, 또 다른 하나는 熔接사이클의 冷却中에 發生하였다. 그림 6은 熔接工程中의 실제 시간데이터 기록의 代表的인 것을 나타낸다. 두 熔接試片의 接觸後 相對運動이 진행되는 동안에 發生한 最初의 AE 領域(A 域)과 熔接에너지의 入力量에 따라 增減되는 두번 째의 AE 領域(B 域)이 관찰되었다. 그림 7에 나타낸 바와 같이, 관성 모우멘트(moment of inertia)와 推力(thrust force)이 一定하게 作用할 때 初期回轉速度(따라서 총 운동에너지)가 감소함에 따라 AE의 B

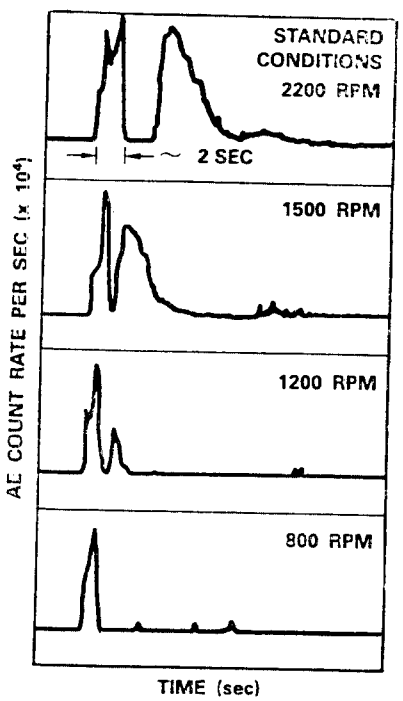


그림 7 摩擦 熔接에서 他變數一定일 때 初期回轉速度가 AE에 미치는 영향.

域 面積이 減少한다.

그림 8은 冷間壓延鋼棒인 SAE 4140과 1215 鋼과의 熔接(熔接面 9.525 mm ϕ)에서 얻은 모든 데이터의 그림이다. 本 實驗에서 慣性모우멘트와 推力이 각각 0.236 kgfm²(5.6 lb·ft²)와 907 kgf(2000 lbs)에서 一定하게 維持되었을 때, 스핀들側 回轉數는 1200 에서 2200 rpm으로 變化시켰다. 각 조건하에서 5회의 熔接을 反復시켜 실험오차의 조사와 統計計算에 반영시켰다.

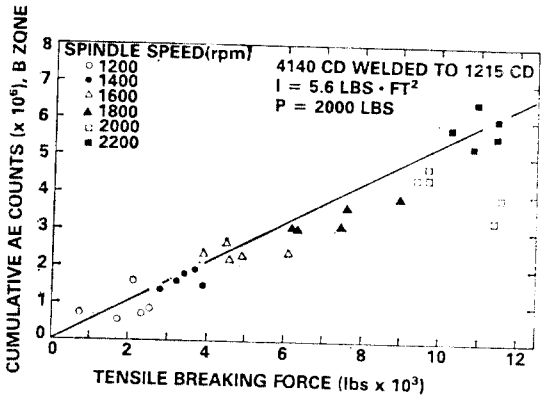


그림 8. B域에서의 AE 總量과 熔接部破斷力과의 相關性(5.6 lb·ft²=0.236 kgfm², 2000 lbs=907 kgf).

그러나 실험 데이터의 散布, 特히 회전수 2000 rpm 에서의 散布가 다소 나타났으며 이는 실험의 오차를 뜻한다.

두 종류의 壓接面 形狀(棒과 棒 및 管과 管 熔接)의 鐵 및 非鐵金屬에 대한 다수의 熔接試驗이 여러가지 熔接條件下에서 수행되었다. 또한 熔接된 試片에 대해서 引張試驗과 微視的 組織檢査가 수행되었다. 담금질 처리된 試片의 組織檢査와 Knoop 硬度試驗結果가 摩擦熔接部에 관한 결과와 비교되었다.

그림 9는 담금질 처리된 試片과 熔接된 試片

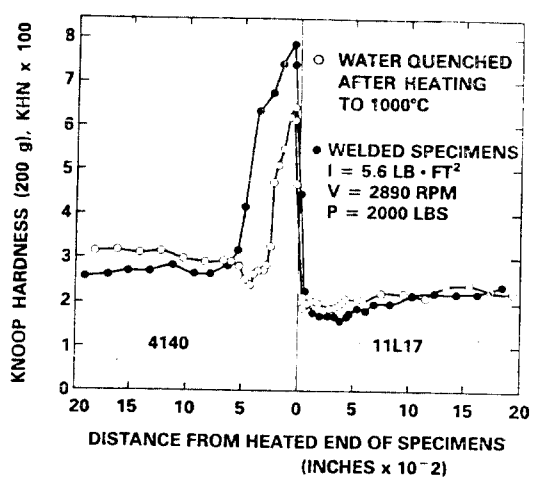


그림 9 水冷담금질 處理材(外周部)와 摩擦熔接材(軸中心部)의 壓接面 부근의 硬度分布.
(5.6 lb·ft²=0.236 kgfm², 2000 lbs=907 kgf).

에 대해 각각 試片中心軸方向과 外周部近處의 Knoop 硬度分布圖이다. 1117鋼棒側 母材에서는 담금질 熱處理材에서, 硬度의 뚜렷한 증가가 보이지 않으나, 熔接面에서의 硬度는 變形硬化의 결과 때문에 약 2배가 되어있다. 다른 한편, 4140鋼棒側 壓接面 近處의 硬度는 담금질 熱處理材에서는 母材의 2倍이고 熔接材에서는 거의 3倍로 增加되어 있다. 이 現象은 담금질과 加工硬化의 複合效果 때문임이 분명하다.

本 研究의 중요 발견으로서 摩擦熔接中에 發生하는 두번 째 돌출 영역인 B域에서의 AE量은 주로 마르텐사이트 變態의 기구에 기인한다고 생각되며 이 變態는 鋼의 摩擦熔接에서 熔接終了後 2, 3秒 지나서 高溫의 鍛造溫度에서 常溫으로 冷却될 때 發生함이 분명하다. 鋼의 마르텐사이트 變態中에 AE를 發生시키는 기구와 상태는 훨씬 더 복잡한 것이지만[14], 다음과 같이 관찰을 통하여 해석을 구체화시킬 수 있을 것이다.

a) 알루미늄과 銅의 摩擦熔接에서는 B域의 현저한 AE 활동이 관찰되지 못하였고, 또한 이들의 담금질의 경우에서도 AE量이 나타나지 않았다.

b) 鋼의 熔接에서의 B域의 크기는 사용된 재료의 탄소함유량과 합금의 영향을 받으며, 이 現象은 담금질된 試片에서의 AE量의 크기에서도 나타난다.

c) 마르텐사이트 組織은 4140鋼側의 熔接部에 현저히 나타나며 이 지역의 硬度 역시 훨씬 높게 나타난다.

5. 結 論

어쿠우스틱 에밋션(AE)法에 依한 摩擦熔接强度의 工程中 解析에 관한 실험적 연구에서의 探索的 研究結果는 다음과 같은 豫備的 結論으로 나타내진다.

1) 鐵金屬의 만족한 摩擦熔接을 달성할 때는 두 개의 AE 돌출이 나타난다. 그 하나는 A域인 熔接사이클 중에 일어나는 것이며, B域인 또 다른 하나는 熔接終了後 2, 3秒 지나서 시작되는 冷却中의 돌출이다. 최초의 돌출은 주로 材料의 塑性變形에 基因하며, 두 번 째 AE 放出은 일반적으로 크기가 더 크며 冷却中의 마르텐사이트 變態의 결과라고 해석된다.

2) AE의 總量과 鋼의 摩擦熔接强度 사이에는 일정한 相關關係가 존재한다고 생각된다. 실험적 오차를 더욱 감소시킨다면 定量關係가 수립될 수 있을 것이다.

3) 트랜스듀서와 기타 부품의 適切한 선택에 依해 鐵金屬의 摩擦熔接品質(强度)을 工程中에 探索하기 위한, AE法에 依한 工程中 熔接强度 解析 시스템의 開發 可能性이 있다.

後 記

여기에 소개된 研究等은 筆者가 Cornell University와 Keio University에서 訪問敎授(1980. 9~1982. 12)로서 수행한 것이며, 協助를 아끼지 않았던 코넬 大學校의 K.K. Wang 敎授, Sandia National Lab.의 G.R. Reif 研究員, Keio 大學의 A. Hasui 敎授와 T. Kunio 敎授에게 深深한 感謝를 드린다.

參 考 文 獻

1. Wang, K. K., "Friction Welding", Welding Research Council Bulletin, WRC Bulletin 204, April 1975.
2. Wang, K.K. and Ahmed, S., "Ultrasonic Detection of Weld Strength for Dissimilar Metal Friction Welds", Proc. of 4th NAMRC, 1976, pp. 384-389.
3. Wang, K.K., Oh, S.K. and Reif, G.R., "In-Process Quality Detection of Friction Welds Using Acoustic Emission Techniques", Proc. of 63rd AWS Convention in Kansas, USA (Apr. 27, 1982). Presentation at KSME Busan-Kyungnam District Spring Meeting (May 8, 1982).
4. Oh, S.K. and Wang, K.K., "Effects of Welding Parameters on Weld Strength and Acoustic

(202페이지에 계속)