

論 文

慣性熔接된 異種材質 IN 713 C-SAE 8630 의 熔接性能에
回轉速度가 미치는 影響

吳 世 奎*

Effects of Rotational Velocity on Weld Character of
Inertia-Welded IN 713 C-SAE 8630

Sae Kyoo Oh

Abstract

Inertia friction welding, a relatively recent innovation in the art of joining materials, is a forge-welding process that releases kinetic energy stored in the flywheel as frictional heat when two parts are rubbed together under the right conditions. In a comparatively short time, the process has become a reliable method for joining ferrous, nonferrous, and dissimilar metals.

The process is based on thrusting one part, attached to a flywheel and rotating at a relatively high speed, against a stationary part. The contacting surfaces, heated to plastic temperatures, are forged together to produce a reliable, high-strength weld. Welds are made with little or no workpiece preparation and without filler metal or fluxes.

However, in order to obtain a good weld, the determination of the optimum weld parameters is an important problem. Especially, because the amount of the flywheel mass will be determined according to the initial rotating velocity values at the constant thrust load, the initial rotating velocity is an important factor to affect a weld character of the inertia-welded IN 713 C-SAE 8630, which is used for the wheel-shafts of turbine rotors or turbochargers, exhausting valves, etc.

In this paper, the effects of initial rotational velocity on a weld character of inertia-welded IN 713 C-SAE 8630 was studied through considerations of weld parameters determination, micro-structural observations and tensile tests. The results are as the following:

- 1) As initial rotating velocity was reduced to 267 FPM, cracks and carbide stringers were completely eliminated in the micro-structure of welded zone.
- 2) As initial rotating velocity was reduced and flywheel mass was increased correspondingly, the maximum welding temperatures were decreased and the plastic working in the weld zone was increased.
- 3) As initial rotating velocity was progressively decreased and carbides were decreased, the tensile strengths were increased.
- 4) And also the fracture location moved out of the weld zone and the tensile tests produced failures only in the cast superalloy IN713C which do not extend into the weld area.
- 5) The proper initial rotating velocity could be determined as about 250 thru 350 FPM for the better weld character.

1. 緒 言

非慣性摩擦熔接(Non-inertia or Conventional friction

Welding)은 1957年 Vill [1]의 指導下에 朝鮮의 연구진 [2], [3]에 의하여 소개되어 研究되었고, 미국, 독일, 영국, 일본등의 여러 나라에서도 研究發展되고 應用되어

* 正會員, 釜山工專

왔다. 反面에 慣性摩擦熔接(Inertia Friction Welding or Inertia Welding)은 미국에서 開發研究되어[4], [5], 1966年 9月 20日에 Oberle, Calton, Loyd, Whie[6]등에 의하여 수행되어 Caterpillar Tractor Co.에 양도된 美特許 3272233에 근거를 두고 發展應用되었다[6]. 그러나 우리나라에서는 이에 대한 研究發表가 아직 없다.

慣性摩擦熔接은, 대체로 高速回轉하는 flywheel에 저속된 運動에너지를 全部 摩擦熱로 전환시켜 두 熔接物의 熔接面이 plastic溫度下에서 回轉과 加壓에 依한 forging work를 일으켜 불순물이나 voids를 제거시키고, 粒子組織을 refine시키므로써 高强度의 熔接은 성취하는 熔接法이다. 熔接時間面에서 볼때, 이 熔接法(1~10 sec)에 依하면 非慣性摩擦熔接(10~60 sec)보다 熔接時間이 10분의 1정도이며, 熔接部에 미치는 열침투속력도 훨씬 빠르다. 非慣性摩擦熔接에서의 熔接單位面積當 入力比率(energy-input rate)이 약 10 hp/in²인 反面에, 慣性摩擦熔接의 경우는 20~150 hp/in²에 달하여 oxides나 voids가 없는 우수한 熔接이 이루어진다[6], [7].

유사용접법인 brazing, flash butt welding, arc welding, electron beam welding, non-inertia friction welding에 비교하여보면, 慣性摩擦熔接은, 熔接性能이 우수하고, 作業이 간단하며, 經濟적이고 多量生産이 可能하며, 熔接時間이 매우 짧고, 非熔融狀態에서 plastic forging이 이루어져 좁은 熱影響部에서의 粒子組織이 치밀하고, flux 등의 용접첨가물이 전혀 不必要하고, 特殊材質 및 異種材質의 棒과 棒, 棒과 板, 棒과 管, 管과 管, 管과 板 등의 熔接에 보다 우수하다는 장점이 있다[8], [9].

그러나 이러한 우수한 熔接性能을 획득하기 위해서는, 最適熔接變數를 決定짓는다는 것이 機械操縱面에서 극히 重要한 問題가 된다. 그런데, 一定推進力(thrust load)下에서는 初期回轉速度에 따라 flywheel의 慣性모멘트량이 決定될 수 있으므로, 세계의 慣性熔接變數中 初期回轉速度가, 慣性熔接된 IN713 C-SAE 8630의 熔接性能에 影響을 끼치는 가장 重要한 要因이 된다. 非慣性摩擦熔接에서는 熔接變數決定의 影響에 對한 研究가, Zakson et al. [10], Vill[11], Khudonogov et al.[12], Lucas[13]등에 依해 報告되었다. 그러나 慣性摩擦熔接에 있어서는 그렇게 많지 않다. Oberle, Loyd, Calton[14] 등이 鋼棒熔接時의 慣性熔接變數值 決定을 論한 바 있고, Kiwalle[15]에 의해 諸形狀의 物質에 對한 慣性熔接變數가 比較된 것이 있다.

本論文에서는, turbine rotor나 turbocharger 및 排氣弁 등의 製作에 使用되는, 慣性熔接된 異種材質 IN713C-SAE 8630의 熔接性能에 對해 初期回轉速度가 미치는 影響에 對한 研究가, 熔接變數決定의 고려와 熔接部의 顯微鏡組織의 觀察과 引張試驗은 通하여 簡單히 試圖되었다.

2. 供試材料 및 試驗方法

供試材料: 使用材料는 turbine rotor나 turbocharger의 羽(wheel) 및 排氣弁 head 등에 使用되고 있는 耐蝕·耐熱性 超合金鋼 Ni-Cr-Fe系 INCONEL 713C와 軸과 排氣弁 stem 등에 쓰이는 高强度靱性 Ni-Cr-Mo 合金鋼 SAE 8630으로서, 그 化學組成은 대략 Table 1과 같다.

炭素鋼이나 合金鋼의 棒과, 鑄造 또는 鍛造된 超合

Table 1. Chemical compositions of IN 713C and SAE 8630

Material	C	Mn	P	S	Si	Nb	Al	Ti	Cu	Fe	Ni	Cr	Mo
IN 713C	0.04	0.5	—	0.007	0.4	1	0.7	2.5	0.2	7	73	15	—
SAE 8630	0.30	0.50	0.04	0.04	0.25	—	—	—	—	—	0.55	0.50	0.20

金鋼의 棒을 慣性熔接하여 接續시킬 때는, 두 物質의 熔接溫度에서의 forging 抵抗差때문에, 即 熔接面에서의 熱과 forging의 適切한 分布均衡을 確保하기 爲해, 炭素鋼 또는 合金鋼의 熔接面 外徑은 約 1/16 inch크게 하고, 內徑은 1/16 inch 작게 하며, 約 1/8~1/4 inch 길이로 두 熔接面에 drilling하는 것이 理想的이다[8], [15]. 따라서 本論文의 試片은 그 形狀과 크기를 Fig. 1과 같이 設計하여 두 棒材를 慣性摩擦熔接後, 平行部の 直徑을 1 inch로 旋削하였다.

試驗方法: Fig. 2에서와 같이 慣性 摩擦 熔接機械 PTM150을 使用하고, thrust load는 熔接變數計算에 依

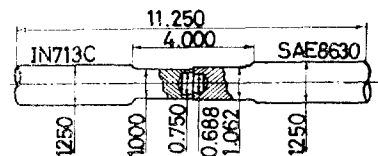


Fig. 1- Shape and dimensions of tensile test specimens, IN 713C(left) and SAE 8630(right)

해 880 psig(1320 lbs)로 固定하고, 初期回轉速度에 따라 flywheel inertial mass를 選定하였다.

Fig. 3은 慣性摩擦熔接 process의 機構概略圖이고,

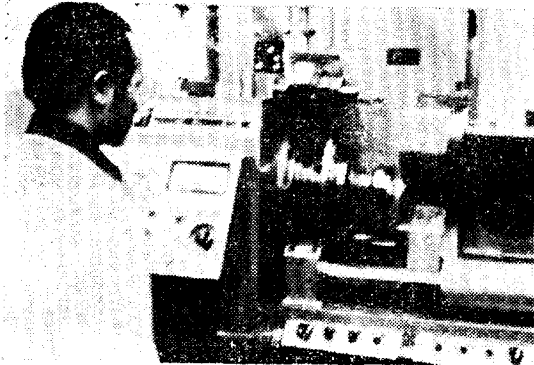


Fig. 2-View of inertia welding on Inertia Welder at the Production Technology Inc., Illinois.

upset 量은 約 0.15 inch 였고, 熔接時間은 2.5 초程度였다. 初期回轉速度 1780 FPM(7120 rpm), 801 FPM(3204 rpm), 400 FPM(1600 rpm), 267 FPM(1068 rpm) 에서, 兩 棒材를 慣性熔接한 後에, 熔接部를 軸方向으로 切斷하여 各熔接部의 顯微鏡組織을 觀察하였고, 倍

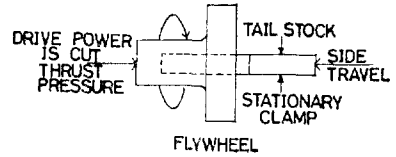


Fig. 3-Schematic of inertia friction welding mechanism

率은 500倍, etching 은 1% nital 을 使用하였다.

引張試驗은, Amsler 萬能試驗機를 使하여 單純히 各 初期回轉速度에 對한 最大引張強度를 求하여, 初期回轉速度가 熔接強度에 미치는 影響을 調査하고, 또 破斷位置를 觀察하였다.

3. 初期回轉商度決算의 一般의 影響

本實驗에 앞서 熔接變數의 一般의 影響을 論할 必要가 있다. 優秀한 熔接性能을 獲得하기 爲해 初期廻轉

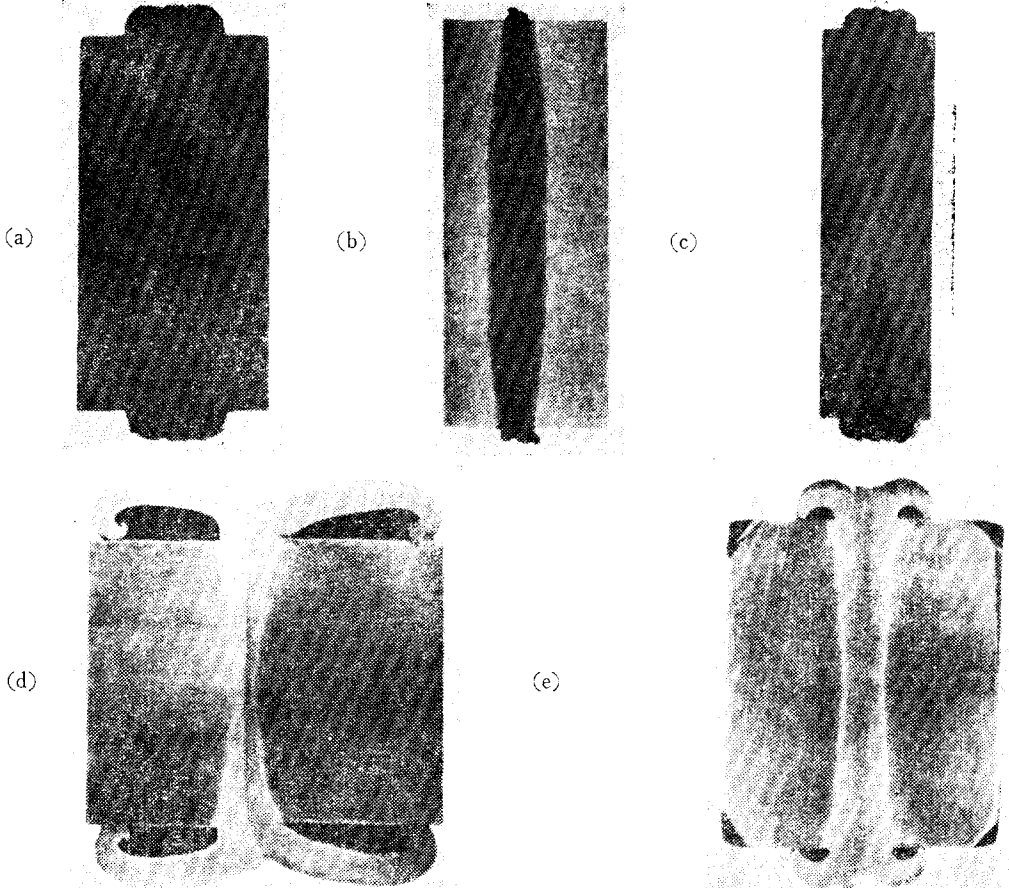


Fig. 4-Views of deep etched cross sections of two inertia-welded solid bars of low-carbon steel, (a) Speed too low, (b) Speed too high, (c) Excessive thrust, (d) Excessive energy, (e) Proper speed, thrust and energy.

速度를 決定함에 他熔接變數와 관련시켜 考慮하지 않으면 안된다. 慣性摩擦熔接의 熔接變數는 回轉速度(rpm), flywheel의 inertial moment(WK^2 , lb-ft²), thrust load (psig)의 세개로서, 이들의 影響을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 直徑 2 inch의 低炭素鋼棒을 1,000 FPM 내지 1,400 FPM에서 慣性熔接한 경우의 熔接部 腐蝕斷面을 나타낸다. Fig. 4(a)는 初期回轉速度가 너무 낮아 熔接面 中心部에 熱浸透가 부족하고 flash 熔接外部表面도 매우 거칠다. 반대로 Fig. 4(b)는 初期回轉速度가 너무 높아 熱이 熔接面 中心部에 集中되었고 熔接表面엔 거의 熱을 받지 못하고, upset도 매우 작다. thrust load 역시 慣性摩擦熔接에 매우 重要하며, 過度의 thrust는 Fig. 4(c)처럼, Fig. 4(a)와 비슷하게 된다. thrust가 부족하면 摩擦熱이 發生하드레도 熔接이 전혀 일어나지 않거나 部分的으로 일어난다. Fig. 4(d)는 flywheel mass가 過大하여, 運動 energy가 격중함에 따라 지나치게 큰 upset가 發生한다. [Fig. 4(e)는 이들 세 熔接變數가 가장 적절할 때 얻은 우수한 熔接結果를 나타내고 있다.

同種鋼棒의 慣性熔接에서도 역시 低速(300FPM 이하)일때는 熔接部의 中心部 加熱이 감소되어 熔接表面이 거칠고 upset도 불균형적이고, 中速(300~900 FPM)에서는 熱影響部가 망콩겍질형이 되고, 900~1,200 FPM에서는 熱影響部가 납작하고 균일하게 나타나며, 高速(1,200 FPM 이상)에서는 中心部가 두터워져 타원형이 됨을 문헌에서도 알 수 있다[8], [9].

따라서, 특히 炭素鋼 및 合金鋼과 超合金鋼과의 慣性熔接에서, 最的의 初期回轉速度를 決定짓는 것이 때

우 重要하므로, 이 初期回轉速度가 熔接性能에 미치는 影響을 實驗調査한 必要가 생기게 된다.

4. 實驗結果

顯微鏡組織 : 所定의 試片을 Fig. 5(a)에서와 같이 初期回轉速度 1,780 FPM(7,120 RPM)에서 慣性摩擦熔接했을 때, 熔接部에 對한 면밀한 顯微鏡組織檢査를 한 結果, 熔接部에 橫方向으로 細弦狀 炭化物(carbide stringers)에 並行해서 crack이 보였다. 이 carbide는 耐蝕性을 低下시키고, 粒界腐蝕의 影響要因이 되며, crack역시 熔接強度를 弱화시키는 要因이므로, 이들을 除去하도록 하지 않으면 안된다. 이에 熔接變數를 여러가지로 操縱하여 이들을 除去하도록 努力한 結果, 初期回轉速度의 決定이 역시 가장 重要함을 알았다. 그리하여 Fig. 5(b)에서와 같이 初期回轉速度 801 FPM(3,204 RPM)에서 慣性熔接했을 경우, crack는 除去되었으나 carbide가 아직 남아 있었다. 400 FPM(1,600 rpm)에서는 carbide도 점차 사라지기 시작했고, Fig. 5(c)에서와 같이 267 FPM(1,068 rpm)에서는 carbide가 完全히 除去되었음을 알 수 있고, 두 異種材質이 보다 強力하게 混合되어 緻密한 粒子組織을 갖고 있다. 이는 또한 減速과 flywheel mass의 增加에 따라 最大熔接溫度가 떨어지고, 따라서 熔接部에서의 塑性作用(plastic working)이 멍렬하고 增加된 것으로 生覺된다.

引張試驗 : 여러 初期回轉速度에 따라 慣性熔接한 試片을 引張試驗하여 Table 2에 그 最大引張強度를 나타내었다. 初期回轉速度가 점차 減速됨에 따라 炭化物이 減少되어 引張強度는 점차 增加함을 알 수 있었다.

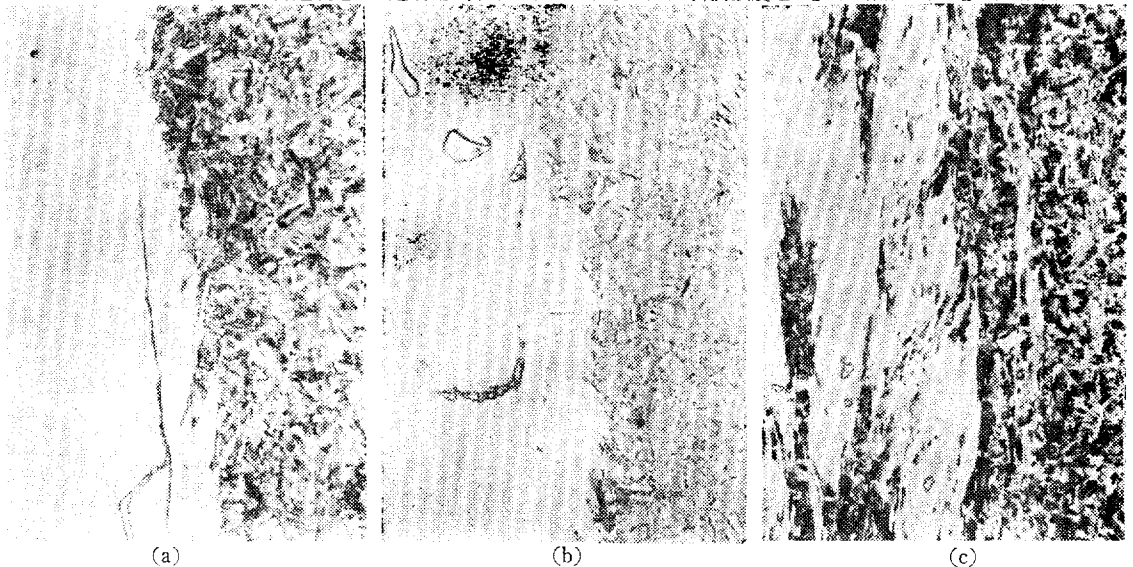


Fig. 5-Microstructures of IN 713C(left)-SAE 8630(right) inertia welded at; (a) 1,780 FPM(7,120 rpm), (b) 801 FPM (3,204 rpm) and (c) 267 FPM(1,068 rpm)

그 破斷位置를 觀察한 結果에 Fig. 6 서와 같이 항상 熔接部를 벗어나 IN 713 C 쪽에 나타남을 알았다.

Table 2-Effect of initial rotating velocity on tensile strength of inertia-welded IN 713C-SAE 8630.

Initial Velocity FPM(rpm)	Ultimate Strength, psi
670 (2,480)	97,500
580 (2,320)	102,500
475 (1,900)	118,000
350 (1,400)	124,000
315 (1,260)	130,000



Fig. 6-Fracture location of tensile test bar, inertia-welded IN 713C-SAE 8630

5. 考 察

균열問題: 中·高炭素鋼과 合金鋼의 慣性摩擦熔接에서 熔接面에 흔히 균열(crack)이 나타나는데, 本研究의 IN713C-SAE 8630의 慣性摩擦熔接時에도 이러한 crack이 생겼다[Fig. 5(a)]. 이는 普通的 棒과 直徑이, 보다 큰 棒의 熔接 및 棒과 平板과의 熔接에 잘 생긴다[14], [15]. 이러한 현상은 冷却中에 熱應力이 熔接面에 作用하여 생긴다고 본다. 高速(1,780 FPM)에서는, 熔接面의 테두리보다 中心部에 熱影響部가 두터웠고 균열현상도 많았으므로[Fig. 5(a)], 熔接變數를 변경하여 減速(801 FPM, 400 FPM)시켜 熔接할 때 熔接中心部에 熱影響部가 얇게 나타났고 균열현상도 사라졌다[Fig. 5(b)]. 그러나 過度하게 低速으로 하면 Fig 4(a)처럼 熔接中心部에 弱點이 생기므로 熔接變數(初期廻轉速度)決定에 注意를 기울여야 할 것이다.

炭化物問題: 첫째, 工具鋼과 炭素鋼 및 合金屬과의 熔接에서도 흔히 炭化物이 나타난다[14]. 熔接部를 破斷시키면 熔接面 주위에 반짝거리는 點들이 보이는데 이런 炭化物을 耐蝕性的의 低下 및 粒界腐蝕에 影響을 주는 熔接短點이 된다. 이런 현상은 炭化物이 熔接過程

에서 完全 熔解混合되지 못한 結果라고 보며, 壓力 또는 energy 增加에 依해서, 즉 速度를 減速시키므로써 이러한 短點이 除去될 수 있다.[Fig. 5(c)], [14], [15].

둘째로, 超合金鋼의 熔接時(IN 713C-SAE 8630)에 熔接面에 炭化物이 部分的으로 나타났는데[Fig. 5(a), (b)], 이는 冷却中에 熔接面에서 炭化物이 凝結된 結果라고 믿어진다. Fig. 5(c)에서 척립 炭化物이 除去된原因에 對해서는, 첫째, 減速에 依한 보다는, 낮아진 熔接溫度가, 橫側으로 뻗은 細弦狀의 炭化物이 熔解하여 再凝結되려는 것을 막았고, 둘째로, 減速에 依한 熔接 energy 增加에 따라 보다 強烈하고 激甚한 混合現象이 擴張되려는 炭化物을 分散시키고, 셋째로, 炭化物이 flash와 함께 外部로 析出되었다고 본다.

따라서, 炭化物 除去問題는, 熔接溫度의 強化와 熔接最後段階에서의 熔接部의 緻密한 混合 量을 增加시켜 주길끔 熔接變數를 變境決定하면, 즉 初期廻轉速度를 低速(267 FPM 程度)으로 해주면, 炭化物이 除去될 것임을 알았다[Fig. 5(c)].

引張試驗: 引張強度 역시 低速일 수록 最大引張強度가 커짐을 實驗을 통해 알 수 있었고(Table 2), 破斷位置는 熔接部에서 일어나지 않았으며 항상 IN 713C 쪽에서 일어난 것을 볼 때 熔接性能面으로도 우수한 것이라고 생각할 수 있다. 실제, Fig. 7에서처럼, 慣性熔接된 turbo-charger의 wheel-shaft IN 713C-SAE 8630의 tensile test 結果를 살펴 볼 때도 그 破斷位置가 熔接部에서 벗어나 wheel 쪽인 IN 713C 쪽에 나타났다.

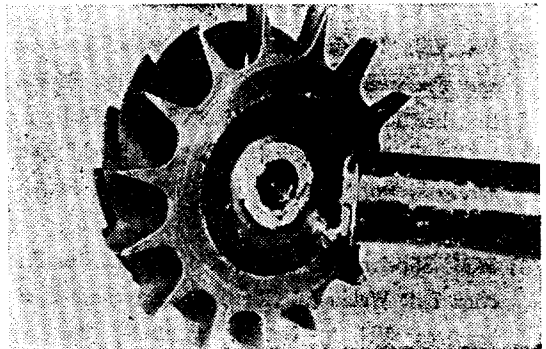


Fig. 7-Fracture location when tensile test of turbo-charger wheel-shaft IN 713C-SAE 8630 inertia weldment.

以上을 綜合해서 살펴보면, IN 713C-SAE 8630의 慣性摩擦熔接時 우수한 熔接性能을 얻기 위해, 즉 균열과 炭化物을 除去할 수 있고, 보다 큰 熔接強度를 얻기 위한 理想的의 初期廻轉速度는, 他 熔接變數決定을 고려하여 대략 250~350 FPM(1,000~1,400 rpm)으로 함이 無難하다고 생각된다.

6. 結 論

慣性摩擦熔接된 異種材質 IN 713C-SAE 8630 의 熔接性能에 初期回轉速度가 미치는 影響에 對해 試驗을 通하여 考察한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 初期回轉速度를 줄임에 따라(267 FPM 에서) 熔接部의 金屬組織에 crack 와 carbide stringers 가 점차 除去되었다.

2. 初期回轉速度를 줄일 때(flywheel mass 는 增加) 最高熔接溫度가 降下하였고, 熔接領域에서의 plastic working 이 增加되었다.

3. 初期回轉速度가 점차 줄어지고, carbide 가 減少됨에 따라, tensile strength 는 增加하였다.

4. 이때 破斷位置도 熔接部 및 熱影響部(HAZ)의 外部로 移動하였고, 破斷은 항상 超合金鋼인 IN 713C 쪽으로 나타났다.

5. IN 713C-SAE 8630의 慣性摩擦熔接에 있어서의 初期回轉速度는, 우수한 熔接性能을 獲得하기 위해, 약 250~350 FPM 으로 決定함이 最適이라고 생각된다.

7. 後 期

著者は 滯美中 研究에 指導를 아끼지 않았던 P.T. Inc. 의 staff metallurgist 인 M.R. Calton 씨와, 격려의 忠告를 아끼지 않았던 W.M. Hallett 씨와 D.A. Drader 씨의 세분계 深甚한 感謝를 드린다.

參 考 文 獻

- [1] V.I. Vill, "Friction Welding of Metals," *Svarochnoe Proizvodstvo*, Vol. 3, No. 9, pp. 19-23, Brutcher Translation No. 4502, Sep., 1957.
- [2] B. Vrana, "The Friction Welding of Steel," *Zvaracscky Sbornik*, Vol. 6, No. 3, pp.327-348, March, 1957.
- [3] M.M. Shpeizman, "The MST-1 Machine for Friction Butt Welding," (Russian) *Svarochnoe Proizvodstvo*, Vol. 3, No. 9, pp.23-24, Brutcher Translation No. 4937, Sep., 1957.
- [4] T.L. Oberle, C.D. Loyd and M.R. Calton, "Inertia

Welding An Efficient Joining Technique," *Metal Progress*, Vol. 87, No. 6, p.104, June, 1965.

- [5] T.L. Oberle, C.D. Loyd and M.R. Calton, "Caterpillar's Inertia Weld Process," *SAE Trans.* Section 3, Vol. 75, pp.28-35, 1967, SAE paper 660470 (Ariz. Sec. Meeting), Oct. 7, 1965.
- [6] T.L. Oberle, M.R. Calton, C.D. Loyd and C.F. White, "Method of Bonding Metal Workpieces," US Patent No. 3,273,233, Sep. 20, 1966.
- [7] E.E. Ferda, "Production Friction and Inertia Welding," *Welding Design & Fabrication*, Vol. 46, N 6, pp.68-70, June, 1972.
- [8] AWS, *Welding Handbook*," Chap. 50, Friction: Welding, 50.3-50.37, 1970.
- [9] ASM, "*Metals Handbook*," Vol. 6, Friction Welding, pp.507-518, 1971.
- [10] R.I. Zakson and V.D. Voznesenskii, "Power and Heat Parameters of Friction Welding," *Nutraktorosel' Khozmash* (Scientific Research Institute of Tractor & Agricultural Machinery), *Welding Production*, No. 10, pp.63-70, 1959.
- [11] V.I. Vill, "Energy Distribution in Friction Welding of Steel Bars," *Welding Production*, No. 10, pp. 31-41, 1959.
- [12] U.N. Khudonogov et al., A System of Recording the Operating Parameters in Friction Welding," *Automalicheskaya Svarka*, No. 4, pp.51-52, April, 1970.
- [13] W. Lucas, "Effect of Selected Process Parameters on Joint Strength and Microstructure of Mild Steel Friction Welds," *The Welding Institute Research Bulletin*, Vol. 12, No. 9, pp.259-259, Sep., 1971.
- [14] T.L. Oberle, C.D. Loyd and M.R. Calton, "Inertia Welding Dissimilar Metals," *Welding Journal*, Vol. 46, No. 6, pp.511-516, June, 1967.
- [15] J. Kiwalle, "Designing for Inertia Welding," *Machine Design*, ps.6, Nov. 7, 1968.